

Hermann Haken · Peter J. Plath
Werner Ebeling · Yuri M. Romanovsky

Beiträge zur Geschichte der Synergetik

Allgemeine Prinzipien der Selbst-
organisation in Natur und Gesellschaft



Springer Spektrum

Beiträge zur Geschichte der Synergetik

Hermann Haken · Peter J. Plath
Werner Ebeling · Yuri M. Romanovsky

Beiträge zur Geschichte der Synergetik

Allgemeine Prinzipien der
Selbstorganisation in Natur
und Gesellschaft



Springer Spektrum

Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Hermann Haken
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr. Werner Ebeling
Berlin, Deutschland

Prof. Dr. Peter J. Plath
Berlin, Deutschland

Prof. Dr. Yuri M. Romanovsky
Moskau, Russland

ISBN 978-3-658-12951-4

ISBN 978-3-658-12952-1 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-658-12952-1

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

*Gewidmet unserem verstorbenen Freund und Kollegen
Rudolf Friedrich,
der zum Entwurf dieses Buches noch entscheidend beigetragen hat.*

Geleitwort

Das Konzept der Synergetik, das in diesem Buch behandelt wird, wurde von mir vor mehr als 40 Jahren entwickelt und hat dann eine stürmische Entwicklung erfahren. Es gab eine breite Resonanz in Ost und West, die sich nicht nur auf die wissenschaftlichen Aspekte der Synergetik beschränkte, sondern auch eine Diskussion über Schlußfolgerungen für die Gesellschaftsentwicklung einbezog. Vielleicht ist es tatsächlich an der Zeit, nun Zeitzeugen dieser Entwicklung dazu zu Wort kommen zu lassen. Ich bin meinen Koautoren und besonders Peter Plath für die Initiative und den großen Einsatz sowie dem Verlag für unser Projekt sehr dankbar und freue mich, der wissenschaftlichen Öffentlichkeit gerade in dem Jahr, indem wir den 25. Jahrestag eines bedeutenden gesellschaftlichen Umbruchs feiern, unsere Überlegungen zur Entwicklung des Konzeptes der Synergetik vorlegen zu können.

Stuttgart

Hermann Haken

Vorwort

Der Plan zu diesem Buch entstand gemeinsam mit Rudolf Friedrich, der plötzlich und unerwartet unter Anteilnahme all seiner Kollegen und Freunde in der gesamten Synergetik-Gemeinde verstarb.

Die auf Hermann Haken zurückgehende Idee der Synergetik als eine Beschreibung selbstorganisierter, makroskopischer Musterbildung nahm ihren Anfang im Jahr 1971 mit dem Artikel „Synergetik –die Lehre vom Zusammenwirken. Was verbindet die Physik, Chemie und Biologie?“, den er zusammen mit R. Graham in der Umschau publizierte. Diese Idee, die er auf Grund einer Verallgemeinerung seiner mehr als zehnjährigen, intensiven Arbeiten zum Laser formulierte, hat sich seither in den verschiedensten Bereichen der Wissenschaft glänzend bewährt und zu vielen neuen Erkenntnissen geführt.

Die Synergetik findet besonders in Rußland und China weiterhin große Beachtung. So erschien soeben in der in Rußland herausgegebenen Reihe: „Synergetik: Von Vergangenheit zur Zukunft“ die Übersetzung von Hakens Buch „Information and Selforganization“ und die russischen Autoren L.N. Lupichev, A.V. Savin, V.N. Kadantsev veröffentlichten in der Springer Series in Synergetics ihr Buch „Synergetics of Molecular Systems“.

Es ist nun nach mehr als 40 Jahren wohl an der Zeit, sich der Anfänge dieser stürmischen Entwicklung, die in der Bundesrepublik Deutschland insbesondere von der Volkswagen-Stiftung gefördert wurde, zu erinnern.

Eine ganz ähnliche Entwicklung, wenn auch teilweise von anderen Fragestellungen ausgehend, fand fast gleichzeitig in Belgien, der DDR, der Sowjetunion und den USA statt. Die Akteure der ersten Stunde dieser Entwicklung – allen voran Hermann Haken, Ilya Prigogine, Werner Ebeling, Juri L. Klimontovich und Anatol Zhabotinsky standen von Anbeginn in regem, wissenschaftlichen Austausch miteinander und kannten einander auch persönlich.

Es ist ein erstaunliches Phänomen, daß es in der Zeit des Kalten Krieges auf dem Gebiet der Synergetik zu so einem intensiven persönlichen Gedankenaustausch auch zwischen den Akteuren der zweiten Stunde unter Einbeziehung der französischen, italienischen, spanischen, englischen und amerikanischen Wissenschaftler kam, unter ihnen A. Pacault, C. Vidal, P. Hanusse, F.T. Arecchi, G. Cagliotti, M. Velarde, P. Gray, St. Scott, R. Noyes, D. Luss, J.

Ross, K. Showalter, J. Hudson, G. Ertl, F. Schneider, H. Linde und vielen anderen mehr.

Der Begriff der Synergetik blieb dabei aber weitgehend auf den alten Kontinent beschränkt und wurde insbesondere im amerikanischen Sprachbereich stärker durch den einschränkenden, mehr technisch-methodischen Begriff der „nicht-linearen Dynamik“ ersetzt, der aber nicht den wissenschaftstheoretisch umfassenden Charakter besaß, wie es dem Begriff der Synergetik eigen ist.

Über diese äußerst faszinierende Zeit der Entstehung eines neuen Verständnisses selbstorganisierter, makroskopischer Strukturbildung werden wir als unmittelbar Beteiligte, jeweils von unterschiedlichen Perspektiven, aus unserer persönlichen Erfahrung heraus berichten.

Anlaß zu diesem Buch war der Vortrag von mir in Münster „Die synergetische Wirkung der Synergetik – Erinnerungen eines Chemikers“, den ich auf Wunsch von Rudolf Friedrich ausarbeitete – ich hatte ihm mehrere Themen aus meiner aktuellen Forschung angeboten. Der Anstoß dazu war ein Telefonat, in dem Rudolf Friedrich mich einlud und sagte, er würde sich ein solches Thema wünschen, es wäre an der Zeit und als der Ältere von beiden könne Peter Plath doch wohl darüber sprechen. Nun, als wir im Sommer 2011 darüber in Münster nachdachten, waren wir uns sofort darüber einig, daß ich die mehr chemischen und Rudolf Friedrich die mehr physikalischen Aspekte behandeln würde und daß wir von den Elmauer Tagungen Hermann Hakens und meinen Winterseminaren auf dem Zeinisjoch als strukturierende Elemente für eine Geschichte der Synergetik ausgehen sollten.

Es waren nämlich diese beiden Berghotels Schloß Elmau (Abb. 1) und der Alpengasthof Zeinisjoch (Abb. 2) in den Alpen, in denen die dort stattfindenden interdisziplinären Tagungen die Entwicklung der Synergetik wie durch Brenngläser, hoch oben in den Bergen, fokussierten.

Die Väter dieser Tagungen H. Haken und P. Plath konnten kaum unterschiedlicher sein als die Hotels, die sie wählten – Schloß Elmau und das Berghotel Zeinisjoch und die Universitäten an denen sie lehrten – die Universitäten Stuttgart und Bremen. Doch sie verband die Freude am Schaffen neuen Wissens, an der von Hermann Haken entwickelten Idee der Synergetik und ihrer Anwendung in den verschiedensten Bereichen der Wissenschaften. Beide Tagungen waren durch gelebte Interdisziplinarität gekennzeichnet. Sie wirkten synergetisch auf die Entwicklung dieser neuen Forschungsrichtung.



Abbildung 1: Schloß Elmau 1985 – Tagungsort der Elmauer Konferenzen

Seit langer Zeit sind beide Akteure gewissermaßen unsymmetrisch miteinander befreundet, durch ihren Altersunterschied bedingt, der Jüngere von beiden in großem Respekt vor der großen wissenschaftlichen Leistung des Älteren.

Wir waren uns aber auch sofort darüber einig, daß wir die Tagungen Werner Ebelings, die er inspiriert von Yuri Klimontovich, Yuri M. Romanovsky u.a. in der DDR veranstaltet hat und weitere für die Entwicklung der Synergetik wichtige Tagungen in Osteuropa mit einbeziehen sollten. Ich übernahm es,



Abbildung 2: Alpengasthof Zeinisjoch – Tagungsort der Winterseminare



Abbildung 3: Ostsee Hotel Kühlungsborn – Tagungsort mehrerer IPSO-Konferenzen.

ihn davon zu überzeugen, denn nur er konnte darüber kompetent Auskunft geben. Werner Ebeling war der *spiritus réctor* der IPSO-Konferenzen in Kühlungsborn / DDR für „Irreversible Prozesse und Dissipative Strukturen“. 1971 erlebte W. Ebeling im Seminar von Pjotr L. Kapiza in der Sowjetunion erstmalig Ilya Prigogine bei einem Vortrag über Selbstorganisation. Werner Ebeling hat seit den 70er Jahren gemeinsam mit dem verstorbenen Yuri L. Klimontovich und mit Yuri M. Romanovsky, dem heutigen Leiter des seit 30 Jahren arbeitenden Synergetik-Seminars in Moskau, fast an allen Konferenzen in Osteuropa und in der DDR mitgewirkt. Zeitlebens blieb er wissenschaftlich und freundschaftlich mit Prigogine verbunden.

Durch den unerwarteten Tod von Rudolf Friedrich ergab sich für uns eine neue Situation, denn wir mußten die Konzeption des Buches neu überdenken.

Hermann Haken übernahm es, im ersten Teil die Entwicklung seiner Konzeption der Synergetik darzulegen und geht dabei auch auf die heutige Situation ein.

Werner Ebeling, der die makroskopische Strukturbildung vor allem aus der Sicht der irreversiblen Thermodynamik beschrieb, beschreibt im zweiten Teil die Entwicklung der Synergetik in der DDR und Osteuropa. Da die Entwicklung der Synergetik in der DDR und in Osteuropa und besonders in der Sowjetunion, von erheblicher Bedeutung auch für die gesellschaftlichen Entwicklungen war, haben wir einen der besten Experten auf dem Gebiet, Prof. Yuri M. Romanowsky, als Zeitzeugen hinzugezogen. Im gemeinsamen Beitrag von Werner Ebeling und Yuri M. Romanowsky soll diese Entwicklung an Hand von Tagungen und Seminaren zur Synergetik und Theorie der Selbstorganisation dokumentiert werden.

Die ersten drei Abschnitte sind vor allem der Herausbildung der Synergetik gewidmet wobei naturgemäß die Sichtweise und Argumentation der Theoretischen Physik den Vorrang hat.

Aber der Ansatz der Synergetik ist viel allgemeiner und geht von seinem Selbstverständnis her über jede Einzelwissenschaft hinaus.

Als Physikalischer Chemiker übernahm ich es, an Hand ausgewählter Beispiele die weitgehend unbekannte, da bis an den Beginn des 19. Jahrhunderts zurückreichende Geschichte der oszillierenden chemischen Reaktionen bis zu dem Zeitpunkt, da sie auf die Synergetik trifft, im vierten Teil dieses Buches zu skizzieren.

Unserem Ansatz gemäß, mit Berichten aus dem persönlichen Erleben, die Entwicklung der Synergetik nachzuvollziehen, habe ich im fünften Abschnitt dieses Buches die Entwicklung der „Chemischen Synergetik“ beispielhaft an Hand der Entwicklung meiner Arbeitsgruppe geschildert. Situationsbedingt jeweils anders, aber doch in groben Zügen sicherlich ähnlich, mag sie in den Arbeitsgruppen abgelaufen sein, die sich in Deutschland mit Oszillationen in der Chemie oder Biologie beschäftigten, z.B. bei Friedemann Schneider, Benno Hess, Otto Rössler, Ludger Rensing und Gerhard Ertl.

Im letzten, sechsten Abschnitt nehme ich noch einmal die ursprüngliche Idee auf, von den ersten zehn Winterseminaren auf dem Zeinisch in den Jahren 1979 bis 1992 zu berichten.

Als Teilnehmer mehrerer Tagungen auf Schloß Elmau und in Kühlungsborn weiß ich, daß all diese Seminare ihren ganz eigenen, unverwechselbaren Charakter hatten. Ihnen allen war gemeinsam das über viele Jahre währende große Engagement der Organisatoren und vor allem auch der Teilnehmer

und deren Begeisterung für die Fülle neuer Ideen, die mit der Entwicklung des weit gefächerten Bereiches der Synergetik verbunden war.

Ich darf an dieser Stelle wohl im Namen aller Autoren dieses Buches unserer Hoffnung Ausdruck geben, daß es uns gelungen sein mag, in unseren sehr persönlichen Beiträgen ein zutreffendes Bild von der Faszination entworfen zu haben, die die Entwicklung der Synergetik auf alle Beteiligte ausgeübt hat – und die heute von unseren Schülern und vielen anderen Fachkollegen lebendig gehalten und aktiv weiterentwickelt wird.

Im Namen aller Autoren danke ich insbesondere auch der freiberuflichen Lektorin, Frau Dr. Angelika Schulz, für ihre unermüdliche Arbeit, unser Werk, trotz all unserer Sonderwünsche, schließlich in einen für den Springer Verlag druckfähigen Zustand gebracht zu haben.

Lychen

Peter Plath

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort	VII
Vorwort	IX

Teil I: Entwicklungslinien der Synergetik 1

H. Haken

1	Ordnung aus Chaos: ein Rätsel?	3
1.1	Was ist Synergetik?	3
1.2	Erinnerungen an die Thermodynamik	5
1.3	Lasertheorie	7
1.4	Die Quantentheorie des Lasers	10
1.5	Grundlegende Einsichten und Konzepte	14
1.6	Herbert Fröhlich und die Versailler Tagungen	15
2	Ein neuer Ansatz	19
2.1	Der Weg zur Synergetik	19
2.2	Warum „Prinzipien“?	21
2.3	Ein erster Rückblick auf die Entwicklung der Synergetik	22
2.4	Das erste Synergetik-Symposium 1972 in Elmau	23
2.5	Weitere Synergetik-Symposien: Eine Auswahl	25
2.6	Anwendungen in Physik, Chemie, Biologie	26
3	Synergetik des Gehirns	29
3.1	Scott Kelso und die Fingerbewegung	29
3.2	Die Analyse elektrischer und magnetischer Felder des Gehirns	32
3.3	Kippfiguren	34
3.4	Der Synergetische Computer zur Mustererkennung	36
3.5	Annäherung an ein reales Gehirn	43
3.6	Psychologie, Psychiatrie, Psychotherapie	45
4	Neue Einblicke	47
4.1	Betrachtungsebenen	47
4.2	Vom Wesen der Ordnungsparameter	50

4.3	Ist die Synergetik eine Universalwissenschaft?	52
4.4	Quo vadis, Synergetik?	54
4.5	Begegnungen mit den Mathematikern	55
5	Das mathematische Gerüst der Synergetik	59
5.1	Beispiel einer Ordnungsparametergleichung	59
5.2	Beispiel für das Versklavungsprinzip	60
5.3	Ordnungsparameter und Versklavung: Zirkuläre Kausalität	61
5.4	Systeme mit vielen Variablen: Woher kommen die Ordnungsparameter?	62
5.5	Verallgemeinerte Ginzburg-Landau-Gleichungen	65
5.6	Vom Ursprung der Analogien	67
5.7	Woher stammen Dämpfungen und Fluktuationen?	70
5.8	Dämpfungen und Fluktuationen in der Synergetik	74
5.9	Die Fokker-Planck-Gleichung	75
5.10	Mastergleichung	77
5.11	Das Theoriegebäude der Synergetik	79
6	Literatur	83

Teil II: Zurückliegende Entwicklungen: Makroskopische Musterbildung in der Chemie noch vor der Synergetik.....87

Peter Plath

1	Einführende Bemerkungen	89
2	Fechner/Wetzlar – die „Wechselspannungsbatterie“	91
3	Rungebilder	93
4	Liesegang Systeme	97
5	Wilhelm Ostwalds oszillierende Auflösung des Chroms	99
6	Das Lotka-Modell	101

7	Autokatalyse	105
8	K.F. Bonhoeffer – Elektrochemische Oszillationen	107
9	Die Beloussow-Zhabotinsky-Reaktion	111
10	Die heterogen-katalytische Wasserstoffoxidation an Metallen	113
11	Literatur	119

Teil III: Entwicklung der Synergetik und Theorie der Selbstorganisation in Osteuropa und der DDR 1971–1990..... 123

Werner Ebeling

1	Einleitung und Vorstellung der Protagonisten	125
2	Begriffsbildung und Vorgeschichte	133
3	Die Tradition der nichtlinearen Dynamik in Rußland	135
4	Zur Entwicklung der Theorie der Selbstorganisation und Synergetik in der DDR und besonders in Rostock und Berlin	137
5	Entwicklung der Synergetik in Osteuropa	145
6	Abschließende Bemerkungen	149
7	Literatur	153

Teil IV: Konferenzen, Tagungen und Seminare zur Synergetik und Theorie der Selbstorganisation in Osteuropa und in der DDR157

Werner Ebeling, Yuri M. Romanovsky

1	Erste Seminare und Vorlesungen	159
2	Die Tagungsreihe „Irreversible Prozesse und Selbstorganisation“ (IPSO).....	163
3	Tagungen in Osteuropa.....	171
4	Workshops, Kühlungsborner Kolloquien, Wartburg-Meetings	177
5	Abschließende Bemerkungen	183
6	Literatur	185

Teil V: Entstehung der Chemischen Synergetik in Bremen – ein Fallbeispiel189

Peter Plath

1	Das Projekt „Oszi“ – Projektstudium	191
2	Aufbau der Arbeitsgruppe „Angewandte Katalyse“	203
3	Einige Konferenzen 1982–1985.....	209
3.1	Das Jahr 1982 – Elmau Symposium, Twente Dynamic Days, Gordon Research Conference	209
3.2	Das Jahr 1983 – „Asilomar Conference on Catalysis“	213
3.3	Das Jahr 1984 – Elmau Workshop on Synergetics, Bremen - Temporal Order, DBG Elmau – Dynamically Organized Systems	217

3.4	Das Jahr 1985 – Kühlungsborn 3. IPSO Konferenz, Elmau, Gordon Research Conference	219
3.4.1	Kühlungsborn 3. IPSO Konferenz	219
3.4.2	Schloß Elmau – International Symposium on Synergetics 1985	222
3.4.3	Gordon Research Conference: Dynamic Instabilities in Chemical Systems – 1985	223
4	Die CO-Oxidation – ein chemisches Beispiel für die Synergetik	227
5	Literatur	237

Teil VI: Winterseminare auf dem Zeinisjoch – Diskussionen zur Synergetik..... 241

Peter Plath

1	Die ersten Winterseminare auf dem Zeinisjoch	243
2	Oszillatorische Phänomene in der Physikalischen Chemie Winterseminare 1981 und 1982	251
3	Aktuelle Fragen naturwissenschaftlicher Theorienbildung – Winterseminar 1983	265
4	Phasen und Phasenumwandlungen – Winterseminar 1984	269
5	Fraktale und zelluläre Automaten – Winterseminar 1985	277
6	Der Alpengasthof Zeinisjoch – Familie Lorenz und Schneelawinen	285
7	Struktur und Dynamik heterogener, chemischer Systeme – Winterseminar 1988	287
8	Messung und Selbstähnlichkeit – Winterseminar 1990	295

9	Faszination des Diskreten – Das 10. Winterseminar auf dem Zeinisjoch 1992	309
10	Liste der Winterseminare auf dem Zeinisjoch	319
11	Literatur	321
	Über die Autoren	327

Teil I: Entwicklungslinien der Synergetik

H. Haken

1 Ordnung aus Chaos: ein Rätsel?

1.1 Was ist Synergetik?

Das dem Altgriechischen entlehnte Wort „Synergetik“ bedeutet „Lehre vom Zusammenwirken“. [1] Aber was soll hier zusammenwirken und was bewirkt dann das Zusammenwirken? Zunächst einmal: alle Gegenstände, die wir mit unseren Sinnen wahrnehmen können, bestehen aus einzelnen Teilen. Die Gegenstände können künstlich sein – wie Häuser, Autos, Fernseher – oder natürlich – wie die unglaubliche Vielfalt der Tier- und Pflanzenwelt zeigt. Je nachdem, wie wir die Gegenstände tatsächlich oder gedanklich zerlegen, und wie diese tatsächlich „beschaffen“ sind, können die Teile verschiedenartiger Natur sein. Dazu einige einfache Beispiele aus der unbelebten Welt: Wasser besteht aus einzelnen Wassermolekülen (H_2O), Luft aus einem Gemisch verschiedener Molekülsorten, ein Siliziumkristall aus Siliziumatomen. In der belebten Natur besitzen Tiere verschiedene Organe, die aus einzelnen Zellen zusammengesetzt sind, die wiederum aus vielfältigen Strukturen bestehen – bis hinunter zu den komplizierten Biomolekülen. Ein besonders faszinierendes Organ ist das menschliche Gehirn, das aus Myriaden von Neuronen besteht. Menschen und Tiere können selbst wieder Teile einer Gesamtheit sein. Zum Beispiel bilden Menschen eine Glaubensgemeinschaft, einen Staat, etc., Vögel und Fische bilden Schwärme, Wölfe Rudel, andere Tiere Herden, ja sogar Bakterien bilden Kolonien. Immer haben wir es mit einem *System* bestehend aus einzelnen Teilen zu tun, wobei es manchmal uns überlassen bleibt, was wir zum System zählen – wo wir also seine Grenzen ziehen. Immer wieder sehen wir, wie stark verschiedene Systeme miteinander verwoben sind – etwa das Ökosystem. Diese Bemerkungen mögen genügen, was wir im Folgenden unter „Teilen“ (oder auch Elementen, Komponenten, ...) verstehen wollen. Was hat es nun mit dem Zusammenwirken auf sich? Teile können aufeinander einwirken. Atome, Moleküle, ja ganze Körper üben Kräfte aus: Beispiele sind die elektrische und magnetische Kraft zwischen elektrischen Ladungen oder die stets wirkende Schwerkraft. Andere Beeinflussungen bestehen in der Übertragung von Energie, Stoffen sowie Information. Hierzu einige Beispiele: Bei der Wärmeleitung wird in einem Gas, einer Flüssigkeit oder einem festen Körper Wärmeenergie von einem Teilbereich auf einen benachbarten übertragen. Bei der Diffusion, einem speziellen Stofftransport, wandern Moleküle in einem Stoff. Energie- und Stofftransport sind grundlegend für alle Lebensvorgänge. Dies gilt nicht nur für die

Vorgänge innerhalb des jeweiligen Systems Pflanze, Tier, Mensch, sondern auch, und das ist fundamental, für die Vorgänge zwischen dem eigentlichen System (Pflanze, Tier, Mensch) und seiner *Umwelt*. Eine Pflanze braucht Wasser, Nährstoffe und das Sonnenlicht. Tiere und Menschen müssen ständig Nahrung aufnehmen (und in degradierter Form ausscheiden). Was bewirken nun die verschiedenen Wechselwirkungen: Das Ergebnis ist – eigentlich – so alltäglich, daß uns das eigentliche Wunder nicht so bewußt wird: Unsere Welt ist nicht eine wüste Ursuppe, sondern besteht aus meist hochgeordneten Strukturen, die in der belebten Natur höchst sinnvoll sind.

Im Gegensatz zu menschlichen Artefakten sind die natürlichen Strukturen aufgrund des *Zusammenwirkens* der jeweiligen einzelnen Teile untereinander von selbst entstanden, durch *Selbstorganisation* also. Kein Mensch, kein Bildhauer etwa, war hier am Werk. Damit gelangen wir zu einem ersten groben Umriß des Problemkreises der Synergetik: Wie kommt es durch das Zusammenwirken der einzelnen Teile eines Systems zur Bildung von Strukturen durch Selbstorganisation? Angesichts der ungeheuren Vielfalt der Systeme in der Welt ist diese Fragestellung viel zu allgemein und ihre Beantwortung bleibt der Forschung in den verschiedensten wissenschaftlichen Disziplinen vorbehalten. Dennoch ist die grundlegende Fragestellung der Synergetik allgemein: gibt es allgemeine Prinzipien für die Strukturbildung durch Selbstorganisation unabhängig von der Natur der Teile? Angesichts der Vielfalt der Teile scheint auch diese Frage nicht beantwortbar.

Der Durchbruch der Synergetik wurde durch eine wichtige Einengung der Fragestellung möglich: Synergetik beschränkt sich auf das Studium solcher Situationen, bei denen sich das *makroskopische Verhalten* des jeweiligen Systems *qualitativ* ändert. Die Synergetik befaßt sich also mit der *Emergenz* neuer Qualitäten. An dieser Stelle ist die historisch relevante Frage aufzuwerfen, ob es in der Wissenschaft schon früher, d.h. vor der Begründung der Synergetik, allgemeingültige Prinzipien für das Verhalten von Vielteilchensystemen gab. Für Physik und Chemie ist diese Frage mit ja zu beantworten und wir werden ihrer Antwort sogleich nachgehen. Es handelt sich um die Thermodynamik (Wärmelehre). Dabei werden wir sehen, daß die daraus gezogenen Schlußfolgerungen ein fundamentales Hindernis für die Erklärung der Entstehung und Funktion lebender Systeme waren. Bevor wir die entscheidende Einsicht der Synergetik darlegen, kurz eine Erinnerung an die grundlegenden Ideen der Thermodynamik.

1.2 Erinnerungen an die Thermodynamik

Dieses Gebiet bezieht sich auf die gesamte Materie, ist also universell angelegt. Grundbegriffe sind Temperatur und Entropie. Während der Temperaturbegriff uns über unseren Wärmesinn direkt zugänglich ist, ist der Entropiebegriff nur indirekt zu erschließen. Die Universalität der Thermodynamik schlägt sich in ihren drei Hauptsätzen nieder:

- 1) Satz von der Erhaltung der Energie
- 2) Der sog. zweite Hauptsatz, den wir, um das Wesentliche deutlich zu machen, so formulieren: In einem abgeschlossenen System kann die Entropie nur zu, aber nicht abnehmen.
- 3) Der absolute Nullpunkt ist unerreichbar.

An diesen Sätzen wird die Synergetik nicht rütteln (um schon hier mögliche Mißverständnisse auszuschließen). Dennoch wird sie bezüglich der Anwendung der Hauptsätze auf Naturvorgänge eine fundamentale Lücke aufzeigen. Es ist hier nicht der Platz, um auf die Entwicklung der Thermodynamik im Einzelnen einzugehen. Der Ausgangspunkt der Überlegungen, die zum Entropiebegriff (Clausius, Helmholtz) führten, waren Ausgleichsvorgänge: Bringt man einen warmen und einen kalten Körper zusammen, so gleicht sich die Temperatur aus. Der umgekehrte Vorgang: Spontane Erwärmung des einen verbunden mit einer Abkühlung des anderen Körpers wird nicht beobachtet. In der Physik war es stets erfolgreich, nach Extremalprinzipien zu suchen (Beispiel: Minimierung der Energie bei der Bildung eines Kristalls), d.h. nach einer Größe, deren Maximierung oder Minimierung den Prozeßverlauf bestimmt. Dies leistet in der Thermodynamik die Entropie, die nach dem oben erwähnten zweiten Hauptsatz in einem abgeschlossenen System einem *Maximum* zustrebt. Die Entropie läßt sich mit Hilfe der absoluten Temperatur und reversibel zu- oder abgeführten Wärmemengen berechnen und auch messen. In unserem Kontext jedoch ist ihre atomare Formulierung, die wir Ludwig Boltzmann verdanken, wesentlich. Sein Grundgedanke läßt sich am Beispiel von Abb. 1 erkennen, bei dem vier Kugeln auf zwei Kästen zu verteilen sind. Offenbar gibt es nur *eine* Möglichkeit („Realisierung“), alle Kugeln im linken Kasten unterzubringen, hingegen sechs Realisierungen, um die Kugeln gleichmäßig auf die beiden Kästen zu verteilen. Im ersten Fall ist die Zahl W der Realisierungen = 1, im zweiten Fall = 6.

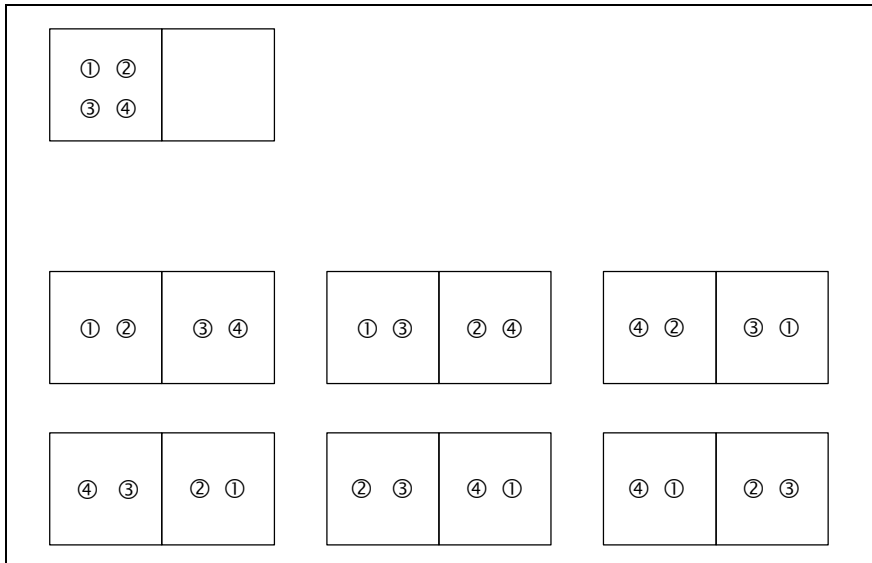


Abbildung 1: Zur Veranschaulichung der Abzählungsvorschrift von Boltzmann, um die größte Entropie zu ermitteln. Obere Bildhälfte: Es gibt nur eine Möglichkeit, die vier Kugeln in einem Gefäß unterzubringen. Untere Bildhälfte: Es gibt sechs Möglichkeiten, die vier Kugeln gleichmäßig auf die beiden Gefäße zu verteilen.

Nach Boltzmann gilt die Beziehung

$$S = k \ln W$$

Wobei S die Entropie, k die Boltzmann Konstante, $\ln$ der natürliche Logarithmus und W die Anzahl der mikroskopischen Realisierungen von Zuständen (siehe Beispiel!) sind. Damit ergibt sich eine neue Einsicht: Das beobachtete Anwachsen der Entropie bedeutet, daß ein physikalisches System danach strebt, die Anzahl W seiner mikroskopischen Realisierungen zu *maximieren*. Halten wir fest:

Das Maß für die Entropie beruht auf der *Abzählung von Zuständen*. Wie schon Abb. 1 nahelegt, ist die Entropie ein Maß für Unordnung: Die Moleküle können ganz verschiedenartig auf die Kästen verteilt sein. Die Bedeutung der Entropiezunahme können wir selbst „erfahren“: Fährt ein Auto, so ist hier nur 1 Freiheitsgrad (Zustand) beteiligt, $W = 1$ und $S = 0$. Bremsst das Auto, so werden Bremsen und Räder erwärmt – die kinetische Energie des ursprünglich einen Freiheitsgrads wird nun auf die sehr, sehr vielen Frei-

heitsgrade bei der Wärmebewegung der großen Zahl der Atome und Moleküle in Bremsen und Reifen verteilt. Dabei ist W sehr groß und damit, nach Boltzmanns berühmter Formel, die Entropie stark angewachsen. Umgekehrt kann man durch Abkühlen warmer Räder und Bremsen nie ein Auto in Bewegung setzen.

Nach dem zweiten Hauptsatz sollte auch die Entropie des Weltalls bis zu deren Maximum zunehmen – man sprach vom Wärmetod der Welt.

Der so wunderbare zweite Hauptsatz erwies sich als fundamentales Hindernis für die Erklärung von Lebensvorgängen: Wie sollte die *Entstehung und Aufrechterhaltung* so hochgeordneter Systeme, wie es ein Lebewesen darstellt, mit dem zweiten Hauptsatz in Einklang stehen, nach dem Ordnung doch zerfallen sollte. Einen ersten Versuch, dieses Dilemma aufzulösen, unternahm Erwin Schrödinger in seinem Buch „Was ist Leben“ [2]. Er schlug vor, daß Lebewesen mit der Nahrung „Negentropie“ aufnehmen und so die Entropie des Lebewesens verringert wird. Der russische Biophysiker Blumenfeld verglich die Entropie eines Lebewesens mit der eines gleich großen Felsblocks und konnte keinen Unterschied feststellen. Anscheinend ist die Entropie doch nicht die entscheidende Größe, worauf ich weiter unten zurückkommen werde. Die Lösung des oben genannten Dilemmas ergab sich aus einer anderen Richtung, nämlich der Physik.

1.3 Lasertheorie

Die Entwicklung der Synergetik ist ohne die Entwicklung der Lasertheorie wohl kaum verständlich, wobei auch meine sehr persönlichen Aspekte ins Spiel kommen. Die detaillierte Darstellung der Entwicklung des Konzepts eines Lasers und seines Vorgängers, des Masers, muß ich mir versagen, da es nichts zur Entwicklung der Idee der Synergetik beiträgt (und auch eine komplexe und kontrovers behandelte Materie mit Prioritätsansprüchen darstellt). Jedenfalls war ich im Frühjahr 1960 bei den Bell Laboratorien in Murray Hill, New Jersey, als wissenschaftlicher Berater tätig. Dabei weihte mich mein früherer Studienfreund Wolfgang Kaiser in ein damals streng gehütetes Geheimnis ein: Man wollte bei „Bell“ den ersten Laser bauen.

Dieser sollte das Prinzip des Masers – eines Apparats zur Erzeugung von *Mikrowellen* – also von Wellen im cm-Bereich – auf die Erzeugung von hochkohärenten *Lichtwellen* ausdehnen. Hierbei ergeben sich grundsätzlich

neue Probleme. Um diese zu beleuchten, sei kurz an die Wirkungsweise des Masers an einem Beispiel erinnert. In einem Metallkasten von der Dimension von einigen Zentimetern können sich elektromagnetische Wellen ausbilden, deren halbe Wellenlänge gleich der Abmessung des Kastens („Resonators“) oder ein Bruchteil (Nenner ganzzahlig) davon ist. Damit können nur Wellen bestimmter *diskreter* Frequenzen auftreten. Nur eine *bestimmte* dieser Wellen (i.a. mit der Grundfrequenz) wird durch energetisch angeregte Moleküle, die in den Resonator geschickt werden, dadurch angeregt, daß die interne Schwingungsfrequenz des Moleküls in Resonanz mit der der elektromagnetischen Welle ist. Der zugrundeliegende Energie-Übertragungsprozeß beruht auf der stimulierten Emission. Dieser von Einstein zur Herleitung des Planckschen Strahlungsgesetzes eingeführte Prozeß besagt, daß ein angeregtes Molekül von einer elektromagnetischen Welle „stimuliert“ wird, diese durch Energieabgabe zu verstärken. Nach diesen Erläuterungen wird das Acronym „Maser“ verständlich: „Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation“.

Entscheidend für den Maser ist, daß hier nur eine einzige Welle angeregt und (durch einen kleinen „Auslass“) nach außen abgestrahlt wird. Da die Linienbreite der molekularen Schwingungen kleiner als der Abstand der Resonatorfrequenzen ist, kann auch nur die eine Welle angeregt werden. Dadurch ergibt sich bei der Ausdehnung des Maserprinzips auf den optischen Bereich – hier von den „Bell“-Forschern noch „optischer Maser“ genannt – eine fundamentale Schwierigkeit: Wegen der viel kleineren Lichtwellenlänge (gegenüber Mikrowellen) passen in den Resonator bisheriger Dimensionen sehr, sehr viele Wellen, die wegen der großen Linienbreite optischer Übergänge alle ausgestrahlt werden. Um diesem Effekt zu begegnen, müsste man den Resonator winzig klein machen – was eine minimale Ausstrahlungsintensität zur Folge hätte und daher (damals) verworfen wurde. Ein erster wichtiger Schritt wurde bei Bell 1961 durch eine theoretische Arbeit von A.G. Fox und V.T. Li getan, die zeigten, daß in einem Zylinder mit seitlich offenen Wänden dessen Endflächen verspiegelt waren, sich in axialer Richtung laufende Wellen ausbilden und „hinreichend lange“ im offenen Resonator verweilen konnten, während alle anderen den „Resonator“ sehr rasch verließen (Abb. 2).

Trotzdem mußten immer noch eine größere Zahl von Wellen (auch „Moden“ genannt) bei der Wechselwirkung mit den Atomen berücksichtigt werden. 1962 entwickelte ich daher eine Vielmodentheorie des Lasers, über die

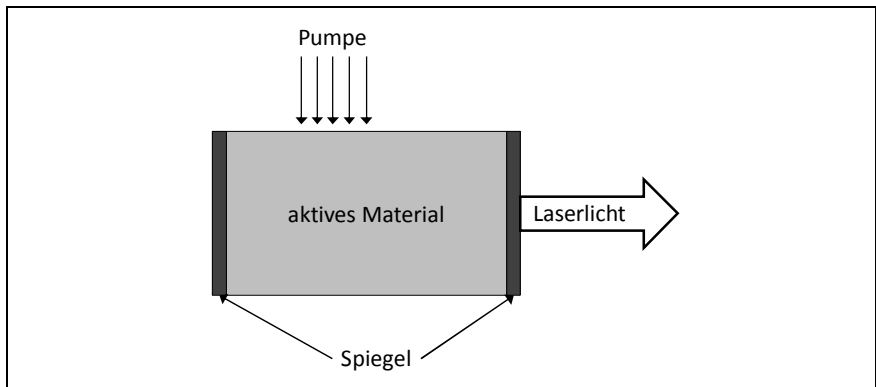


Abbildung 2: Typischer Aufbau eines Lasers

ich auf einer Tagung über optische Pumpen in Heidelberg vortrug. Willis Lamb (der Entdecker der Lambshift) hörte zwar nicht meinen Vortrag, hatte mit mir aber darüber eine private Diskussion. Dabei stellte sich heraus, daß wir beide zu dem gleichen Ergebnis gekommen waren: über die Wechselwirkung mit den Atomen ergibt sich eine direkte, nichtlineare Wechselwirkung zwischen den Moden. Gemeinsam mit meinem damaligen Diplomanden Herwig Sauermann arbeitete ich diese Theorie, die auf der sog. Heisenberg-Gleichungen beruht, weiter aus, was dann 1963 zu Veröffentlichungen führte. Hierbei ergab sich u.a., wie durch die nichtlineare Wechselwirkung z.B. bei einer laufenden Welle nur diese eine selektiert wird, warum in anderen Fällen Wellen koexistieren können und wie sich Frequenzen in bestimmter Weise verschieben. Dabei ergab sich auch die schon früher bekannte Bedingung für die Entstehung von Laserlicht. 1964 erschien die Arbeit von Willis Lamb, die sich auf den Gaslaser bezog und sich mit der Haken-Sauermann Theorie als äquivalent erweist (wir hatten darüber hinaus auch den Festkörperlaser behandelt). Willis Lamb hatte seine Theorie als „semi-classical“ bezeichnet, weil er das Lichtfeld als klassische Größe, die Atome hingegen quantentheoretisch mit der Dichtematrix behandelte. Trotz dieser Übereinstimmung Haken, Sauermann / Lamb blieb bei mir (vielleicht auch bei anderen?) ein Unbehagen: Während oberhalb einer bestimmten Energiezufuhr das streng kohärente Laserlicht auftritt, passiert unterhalb von der Laserwelle gar nichts – obwohl auch hier das übliche Licht einer Lampe auftritt. Diesen Mangel konnte ich 1964 beheben, wobei sich – wie ich glaubte – erstmalig ein völlig neuer Einblick in die Natur des Übergangs vom ungeordneten Licht einer Lampe zum hochgeordneten Laserlicht ergab [3]. Wo-

raus besteht das Lampenlicht? Betrachten wir als Beispiel das Leuchten einer Gasentladungsröhre, in der Moleküle durch einen hindurch gesandten Strom immer wieder angeregt werden, um dann jeweils einen Lichtwellenzug auszusenden. Diese Emissionsprozesse erfolgen statistisch völlig unabhängig – Lampenlicht ist also völlig ungeordnet. Ein Verständnis des Laserübergangs wird also Einblick geben, wie aus Unordnung Ordnung entsteht, durch Selbstorganisation.

1.4 Die Quantentheorie des Lasers

Bei seiner Herleitung des Planckschen Strahlungsgesetzes hatte Einstein neben der stimulierten Emission noch zwei weitere Prozesse bei der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie betrachtet: die spontane Emission und die Absorption von Licht. Für mich ist es nach wie vor eine Ironie der Wissenschaft, daß ausgerechnet Einstein entgegen seinem Diktum „der Alte würfelt nicht“ einen Prozeß einführte, ein Musterbeispiel für einen Zufallsprozeß, nämlich eben der spontanen Emission von Licht, genauer gesagt von einem Lichtquant. Später behandelten V. Weisskopf und E. Wigner (1930) im Rahmen der Quantenelektrodynamik (die ihre eigentliche Blüte erst viel später erleben sollte) die Ausstrahlung eines Lichtquants von einem angeregten Atom im Detail und fanden insbesondere eine Formel für die sog. natürliche Linienbreite. Nun ist bei einem Laser die Problematik wesentlich komplizierter: Wir haben es mit sehr vielen Atomen (bzw. Molekülen) zu tun, die außerdem von außen immer wieder energetisch angeregt werden. Auch diese Anregungen stellen einen Zufallsprozeß dar, den ich 1964 explizit bei den Lasergleichungen berücksichtigte [3]. Diese waren wie schon von Anfang an Operatorgleichungen im Heisenbergbild. (Der Leser, die Leserin mögen mir diese Termini *technici* verzeihen; diese sind hier nur für den Fachmann gedacht.) Wichtig im jetzigen Kontext sind nur folgende Aspekte: Diese Gleichungen beziehen sich auf eine räumlich vorgegebene Welle („Einmodenlaser“), die aber noch erst zu berechnende Amplituden hat. Diese Mode ist an eine große Zahl (z.B. 10^{16}) Atome gekoppelt. Jedes von ihnen ist durch zwei Größen gekennzeichnet: das Dipolmoment und die Differenz aus den Besetzungszahlen vom oberen und unteren Energieniveau. Wir haben es also mit einem Vielteilchenproblem mit sehr vielen Freiheitsgraden zu tun. Dieses System wird von außen her angeregt (und gibt z.B. durch die Lichtausstrahlung Energie nach außen ab). Im Sinne der Thermodynamik ist es ein *offenes System*, das an sog. Wärmebäder gekoppelt ist. Durch diese Ankopplung

wird das eigentliche Lasersystem vom thermischen Gleichgewicht weggetrieben oder, mit anderen Worten, es operiert *fern vom Gleichgewicht*. Ähnlich wie bei der schon oben besprochenen „halbklassischen“ Lasertheorie konnte ich die vielen Freiheitsgrade der Atome eliminieren und es ergab sich eine ziemlich einfach aussehende Gleichung. Zunächst für den Fachmann: es war eine Differentialgleichung 2. Ordnung für den Erzeugungs- und Vernichtungsoperator von einem Boson (dem Lichtquant), die auch eine Nichtlinearität sowie eine stochastische Rauschkraft enthält – die hier also neu auftrat. Nun für den an diesen Details nicht so Interessierten: Sah man die Operatoren als klassische Größen an, so ergab sich folgendes Bild: Diese klassische Größe – die man als Amplitude der Laserlichtwelle auffassen kann, verhält sich wie ein Teilchen, das sich in der in Abb. 3 gezeigten Gebirgslandschaft bewegt, dabei abgebremst wird, andererseits aber immer wieder durch die völlig unregelmäßigen Stöße der Rauschkraft angestoßen wird. Die Form der Gebirgslandschaft, fachlich ausgedrückt des Potentials, wird dabei wesentlich von der, dem Laser zugeführten, Leistung bestimmt. Hierbei gibt es drei qualitativ verschiedene Bereiche: Bei schwacher Anregung („Pumpstärke“) ergibt sich ein Potential mit nur einem Tal, einem Minimum also. Liegt die Kugel hier, findet keine Ausstrahlung statt. Wird die Kugel durch Stöße den Berg hinaufbefördert, so rollt sie sogleich zurück – jedes Mal wird ein dann abklingender Wellenzug angeregt. Da die Stöße unregelmäßig erfolgen, sind die ausgestrahlten Wellenzüge völlig unregelmäßig – das mikroskopische Licht einer Lampe! Wird die Pumpstärke erhöht, so deformiert sich das Tal und wird sehr flach. Die Stöße können die Kugel jetzt sehr weit treiben: die Schwankungen der Lichtamplitude werden groß. Wegen der geringen Neigung der „Bergflanken“ ist zugleich die rücktreibende Kraft klein, sodaß die Kugel nur sehr langsam zurückrollt (beide Effekte berechnete ich damals quantitativ). Aber nun kommt das eigentlich Interessante: Wird die Pumpstärke noch weiter erhöht, so verformt sich das Potential qualitativ. Das vorherige Tal weicht einer Kuppe und es tun sich zwei neue Täler auf (ich vereinfache hier etwas: an sich tut sich ein Ringtal auf; für spätere Schlußfolgerungen für die Synergetik tut dies nichts zur Sache).

Für unsere Kugel, deren Lage ja die Größe der Lichtwellenamplitude darstellt, ergeben sich einschneidende Folgerungen: Die bisherige Null-Lage wird instabil – ein kleiner Stoß genügt, um die Kugel aus dieser Lage wegzutreiben. Dabei ergeben sich im jeweiligen Bild zwei neue stabile Lagen. Wohin die Kugel geht, entscheidet die *zufällige* Richtung des Stoßes der zu-

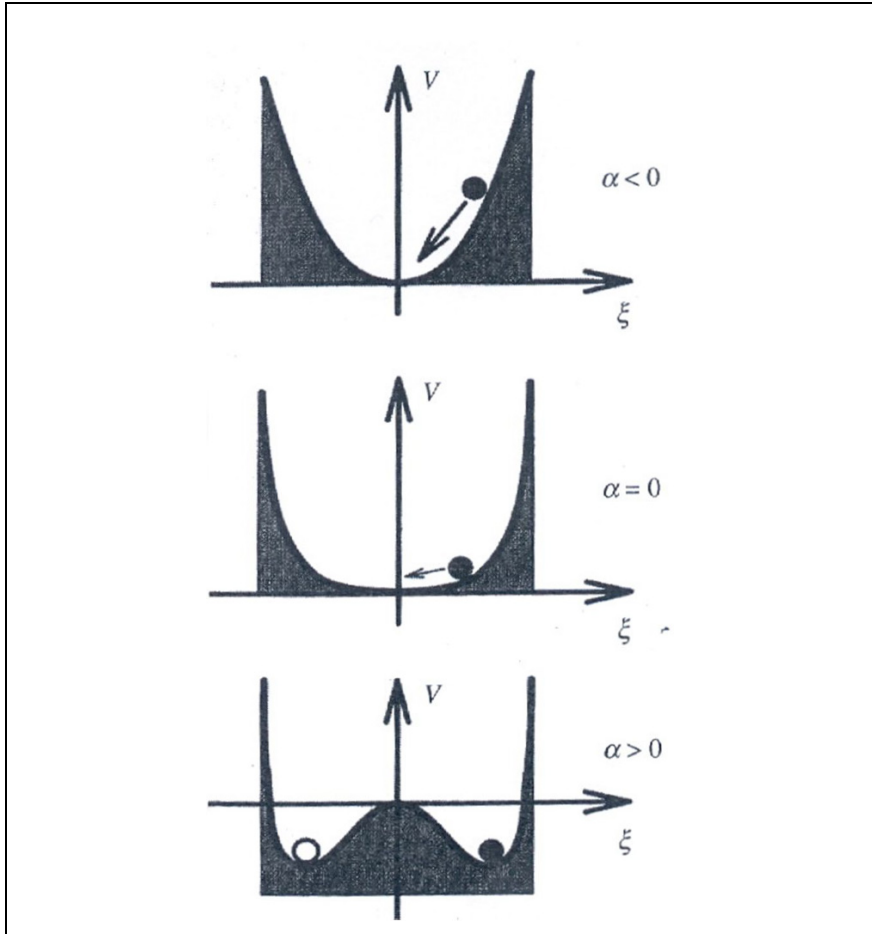


Abbildung 3: Ein grundlegendes Beispiel für die Deformationen der Potentiallandschaft eines Ordners bei Änderung eines Kontrollparameters α im Hinblick auf Selbstorganisationsvorgänge. Das sog. Potential V , d.h. die Höhe der jeweiligen Stelle im Gebirge, ist gegenüber dem Ordner ξ aufgetragen. Oben: Ist $\alpha < 0$, so existiert nur ein Tal. Die hinabgleitende Kugel findet ihre Ruhelage bei $\xi=0$. Mitte: In diesem Fall ist das Tal sehr flach geworden. Beim Vorhandensein von Stößen auf die Kugel kommt es zu *kritischen Fluktuationen*. Da das Tal sehr flach ist, ist die rüctreibende Kraft gering, und die Kugel rollt nur langsam zurück, wenn sie ausgelenkt wird (*kritisches Langsamerwerden*). Ist schließlich $\alpha > 0$, so bilden sich zwei Täler aus. Die ursprüngliche stabile Lage bei $\xi=0$ wird instabil. Die Kugel kann nun zwei Positionen einnehmen, aber im konkreten Fall nur eine realisieren (*Symmetriebruch*).

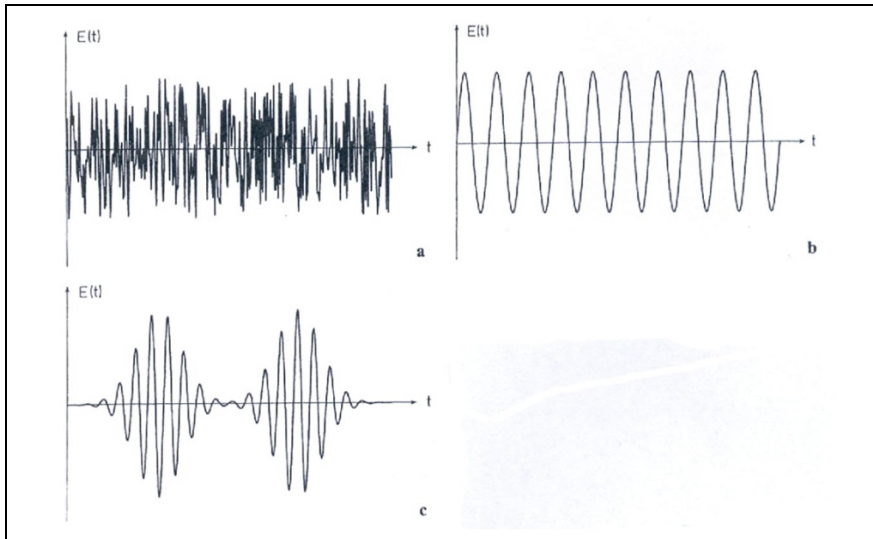


Abbildung 4: Schematisch a) Feldstärke $E(t)$ als Funktion der Zeit im Falle einer Lampe b) $E(t)$ im Falle eines (Monomoden-)Lasers c) $E(t)$ im Falle ultrakurzer Pulse

gleich dafür sorgt, daß die Kugel ihre Null-Lage verläßt. Was bedeutet die Lage der Kugel in einem der neuen Täler: Sie stellt eine von Null verschiedene Amplitude des Lichts dar: das ist der Laserzustand. Mit etwas erhöhter Pumpstärke werden die Täler tiefer und die Abhänge steiler. Dies bedeutet, daß die Stöße die Kugel nur wenig von ihrer jetzigen Ruhelage wegtreiben können: die Amplitudenschwankungen werden sehr klein und die Rückkehrzeiten in die Talsohle (die Relaxationszeiten also) kurz. (Nur noch eine Bemerkung für den Fachmann: Bei dem oben erwähnten Fall eines ringförmigen Tals ist die Amplitude (Abstand der Kugel vom Nullpunkt) stabil, während die Phase in tangentialer Richtung aufgrund der Stöße diffundiert, was zur Linienbreite des Laserlichts führt.)

Fassen wir zusammen: Die Änderung der von *außen her kontrollierten* Pumpstärke bewirkt eine qualitative Änderung der Potential-„Landschaft“. Als Folge davon wird die im Wesentlichen durch die zufälligen Stöße regierte und daher *ungeordnete* Ausstrahlung (das Licht einer *Lampe*) durch das Laserlicht mit seiner *stabilen* Amplitude, das dadurch hochgeordnet und somit kohärent wird, abgelöst. Dabei spielen die Schwankungen praktisch keine Rolle, obgleich sie für den *Anstoß* (Verlassen des „Nullzustands“) *unerlässlich* sind (Abb. 4). Dem, was ich hier veranschaulichend geschildert