

Kapitel 1

Einleitung

Überall in Natur und Umwelt trifft man auf Phänomene, die skalenfrei in Raum und Zeit sind. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die fraktale Gestalt der Küste von Norwegen, die als hierarchische Struktur von Fjorden, von Fjorden in Fjorden, von Fjorden in Fjorden in Fjorden und so weiter erscheint (siehe Abb. 1.1). Die Frage nach der typischen Länge bzw. Größe eines Fjords macht keinen Sinn und hat keine Antwort, das Phänomen ist skalenfrei im Raum [1].

Ein anderes bekanntes Beispiel ist das $1/f$ -Rauschen, das man in vielen verschiedenen Signalen [2, 1], wie beispielsweise in der Intensität des von Quasaren ausgesandten Lichtes [3], beobachten kann (siehe Abb. 1.2). Das Signal variiert auf verschiedenen Zeitskalen, es gibt Veränderungen innerhalb kurzer Zeiträume und langanhaltende Variationen, die sich über viele Jahre erstrecken. Wie bei den Fjorden Norwegens, bei denen es keine typische Länge gibt, hat in $1/f$ -Signalen die Frage nach einer typischen Zeitdauer für die Intensitätsveränderung keinen Sinn – das Phänomen ist skalenfrei in der Zeit [1].

Mathematisch drückt sich die Skalenfreiheit in Raum und Zeit durch Potenzgesetze der Form

$$D_S(S) \sim S^{-\mu} \tag{1.1}$$

$$D_T(T) \sim T^{-\nu} \tag{1.2}$$

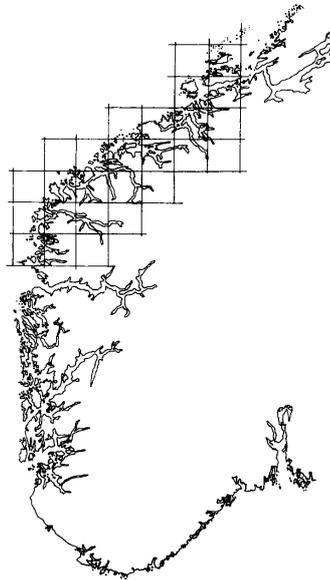


Abbildung 1.1: Die Küste von Norwegen. (Abb. 6(a) aus [1]).

aus, wobei S für die Größe (räumliche Ausdehnung) und T für die Zeit steht, und μ und ν positive reelle Konstanten sind.

Da komplexe Systeme aus vielen Teilen bestehen, kann es in ihnen zu sehr großen Ereignissen (“Katastrophen”) kommen, indem ein Teil viele andere Teile des Systems in einer Art von Domino-Effekt beeinflusst. Risse in der Erdkruste breiten sich in dieser Weise aus und erzeugen Erdbeben, mitunter mit enormen Energien [1]. Die Häufigkeitsverteilung von Erdbeben mit bestimmter der Stärke (freigesetzte Energie) folgt dabei einem Potenzgesetz, dem Gutenberg-Richter Gesetz [4] (siehe Abb. 1.3). Da die freigesetzte Energie von Erdbeben ein Maß für deren räumliche Ausdehnung ist, folgt die Verteilung $D_S(S)$ von Erdbeben der Größe S wiederum einem Potenzgesetz der Form Gln. 1.1. Es gibt daher keine typische Größe für ein Erdbeben [1] – das Phänomen ist skalenfrei im Raum.

Ein anderes bekanntes Beispiel – dieses Mal aus dem Bereich der Biologie — ist

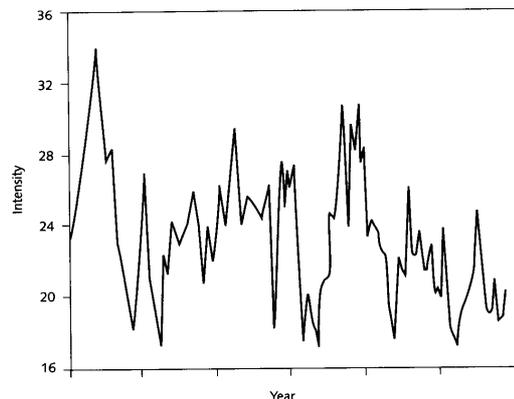


Abbildung 1.2: Lichtemission eines Quasars zwischen 1887-1967. Man beachte das Muster aus kurzzeitigen, mittelfristigen und langandauernden Variationen der Intensität (Abb. 7 (a) aus [1]).

Raup's "kill curve" [5] in Abb. 1.4. Hier ist die Häufigkeitsverteilung $D_T(T)$ der Lebensdauer T von Gattungen im Laufe der Evolution aufgetragen. Wiederum zeigt sich ein Potenzgesetz der in Gln. 1.2 angegebenen Form.

Alle diese Phänomene haben eines gemeinsam: sie treten in *offenen komplexen Systemen mit vielen Freiheitsgraden auf*. Darüberhinaus sind die betrachteten Systeme *im allgemeinen weit weg vom Gleichgewicht*.

Komplexes Verhalten, das durch Potenzgesetze charakterisiert wird, findet man in abgeschlossenen Gleichgewichtssystemen nur unter sehr speziellen Bedingungen, wenn ein Parameter, beispielsweise die Temperatur, bei einem Phasenübergang genau auf einen kritischen Wert eingestellt wird [1]. Im Gegensatz hierzu treten die oben betrachteten und uns überall begegnenden skalenfreien komplexen Phänomene in Nichtgleichgewichtssystemen auf, ohne daß ein Parameter, wie die Temperatur, auf einen bestimmten Wert (etwa in einem Labor) eingestellt wird. Auf der Suche nach einer dynamischen Ursache für die oben beschriebenen Phänomene wurde von Bak, Tang und Wiesenfeld (BTW) das Konzept der *selbstorganisierten Kritikalität (SOC)* eingeführt [2]. Danach können sich offene, dynamische und komplexe Systeme in selbstorganisierte kritische Zustände entwickeln.

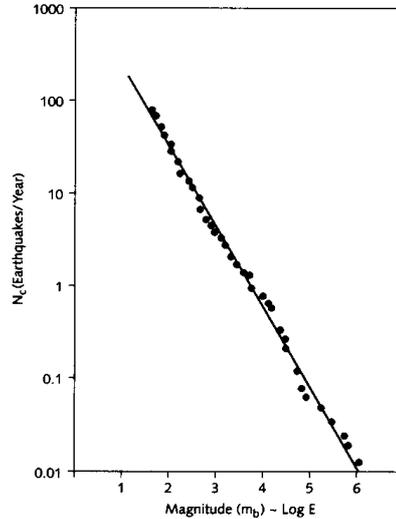


Abbildung 1.3: Gutenberg-Richter-Gesetz zur Verteilung der Größe von Erdbeben (Abb. 2a aus [1]).

Selbstorganisiert bedeutet, daß die Dynamik des Systems unabhängig von den Anfangsbedingungen und unabhängig von der Wahl spezieller Parameterwerte (wie etwa der Temperatur) zu solchen Zuständen führt. Kleine lokale Störungen dieser Zustände können sich im System durch lokale Wechselwirkung benachbarter Elemente ausbreiten und führen so in einer Art von Dominoeffekt zu Fluktuationen bzw. Lawinen, die sich der Größe S und ihrer Lebensdauer T nach über alle Größen- und Zeitskalen erstrecken können und bewirken, daß Energie aus dem System dissipiert. Die Verteilung $D_S(S)$ der Größe S und die Verteilung $D_T(T)$ der Lebensdauer T der Lawinen, die von BTW auch als Cluster bezeichnet werden, folgt in diesem Fall den Potenzgesetzen der in den Gln. 1.1 und 1.2 angegebenen Form. Die Potenzgesetze für die Verteilungen $D_S(S)$ und $D_T(T)$ der BTW-Lawinen bzw. BTW-Cluster sind die Fingerabdrücke selbstorganisierter Kritikalität [2, 1], da sie typisch für SOC-Systeme sind. Ein BTW-Cluster kann man nicht mit einem Cluster im üblichen Sinne identifizieren. Es ist eine

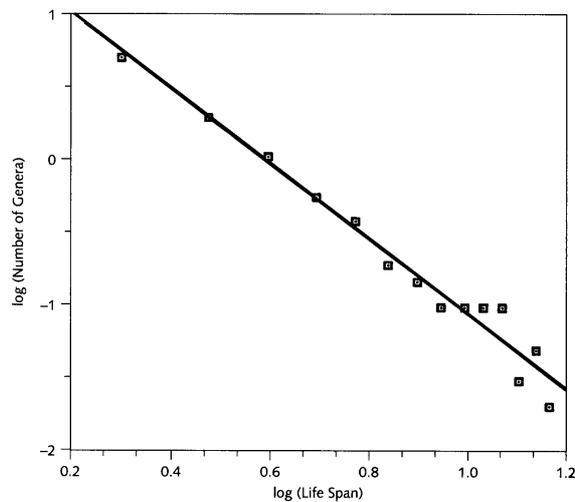


Abbildung 1.4: Raup's "kill curve" [5]. Die Abbildung zeigt die Häufigkeitsverteilung der Lebensdauer von Gattungen im Laufe der Evolution (Abb. 39 (b) in [1]).

Lawine, kein statisches Objekt mit fester Struktur.

Ein besonders einfaches Beispiel für selbstorganisierte Kritikalität in einem offenen komplexen System ist ein Sandhaufen [2, 1], der durch sukzessive Zugabe von Sandkörnern gebildet wird. Mit der Zeit wird der Sandhaufen immer größer und es bilden sich Gebiete mit kritischer Steigung heraus. Die Zugabe einzelner Sandkörner, also einer kleinen Störung des Zustandes, kann zu Lawinen führen, die sich über alle Längen- und Zeitskalen erstrecken, lediglich begrenzt durch die endliche Größe des Haufens. Die Entwicklung des Systems und das selbstorganisierte kritische Verhalten kann mit einfachen Computerprogrammen nachvollzogen werden [10].

Auf Grundlage des Konzeptes der selbstorganisierten Kritikalität (SOC) [2] können viele Phänomene, die in offenen, komplexen, dynamischen Systemen auftreten, verstanden und beschrieben werden [1, 7]. Insbesondere kann selbstorganisierte Kritikalität als die dynamische Ursache für das skalenfreie Verhalten der oben angeführten Beispiele angesehen werden. So hat man experimentell beobachtet, daß die Verteilung von in Sand- bzw. Reishaufen [8, 9] auftretenden Lawinen der

Größe S und Dauer T Potenzgesetzen der in den Gln. 1.1 und 1.2 angegebenen Form gehorcht. Es handelt sich also um ein SOC-Phänomen. Bemerkenswert ist dabei die Beobachtung, daß die durch BTW-Lawinen geformte Landschaft bzw. deren Begrenzung fraktale Eigenschaften hat [1, 8]. Mit anderen Worten, Fraktale können aus einem selbstorganisierten kritischen Prozess hervorgehen. So gesehen kann die fraktale Gestalt der Küste Norwegens als Schnappschuß eines selbstorganisierten kritischen Prozesses angesehen werden[1]. Im Rahmen des SOC-Konzeptes kann das oben erwähnte $1/f$ -Rauschen verschiedener Signale [2, 3] als Ausdruck selbstorganisierten Kritikalität der dem jeweiligen System zugrundeliegenden Dynamik verstanden werden [2]. Desweiteren wurde mit einfachen Modellen demonstriert [1, 11, 12, 13], daß das Konzept selbstorganisierter Kritikalität bei der Beschreibung biologischer Zusammenhänge mit Erfolg Anwendung findet. So kann das lawinenartige Aussterben von Arten im Laufe der Evolution [16] mit dem SOC-Evolutionsmodell von Bak und Sneppen [12] simuliert werden. Auch das in Abb. 1.4 dargestellte Potenzgesetz für die Häufigkeitsverteilung von Arten mit bestimmter Lebensdauer (*Raup's kill curve*) läßt sich mit Hilfe von SOC-Evolutionsmodellen verstehen [17], wenn auch der konkrete Zahlenwert des Exponenten unverstanden ist. Schließlich sind auch Erdbeben ein SOC-Phänomen. Das Gutenberg-Richter Gesetz [4] für der Verteilung $D_S(S)$ von Erdbeben der Größe S kann mit Hilfe von SOC-Modellen [14] verstanden und beschrieben werden.

Selbstorganisierte Kritikalität kann also viele verschiedene Phänomene in komplexen Systemen erklären, daher stellt sich eine Frage von grundsätzlicher Bedeutung:

Existiert derartiges selbstorganisiertes kritisches Verhalten auch im mikroskopischen Bereich, auf der fundamentalen Ebene der Materie — auf der Ebene von Quarks und Gluonen?

Die Frage, ob SOC auch in Systemen miteinander wechselwirkender Gluonen exi-

stiert, ist auch aus folgenden Gründen von außerordentlichem Interesse: Durch die Inbetriebnahme des ersten Elektron-Proton-Colliders HERA [18] ist das Auflösungsvermögen bei der Untersuchung der Struktur des Protons erheblich verbessert und der kinematisch erreichbare Bereich vergrößert worden [18]. Insbesondere ist man dabei in den sogenannten klein- x_B -Bereich vorgestoßen (Details siehe Kap. 2), bei dem das Elektron an Quarks bzw. Antiquarks mit sehr kleinem Bruchteil am Impuls des Protons gestreut wird. Dabei wurden bei HERA zwei wichtige Beobachtungen gemacht: Zum einen wurde Gluondominanz [19] im klein- x_B -Bereich beobachtet. Zum anderen hat man eine besondere Art von Ereignissen im klein- x_B -Bereich beobachtet, sogenannte LRG-Ereignisse [21], die gemessen an der Gesamtzahl der Ereignisse etwa 10% ausmachen[18].

Die im klein- x_B -Bereich beobachtete Gluondominanz, die sich in einem starken Anstieg des Wirkungsquerschnittes tiefinelastischer Elektron-Proton-Streuung im klein- x_B -Bereich manifestiert, zeigt, daß in diesem kinematischen Bereich weiche Gluonen, also Gluonen mit kleinem Bruchteil am Impuls des Protons, eine dominierende Rolle spielen [18, 19]. Die Existenz der LRG-Ereignisse [21] deutet darauf hin, daß in diesen Ereignissen das Elektron mit einem farblosen Objekt (color-singlet-Zustand, der keine Farbquantenzahlen im Sinne der Quantenchromodynamik(QCD) trägt) wechselwirkt.

Zur Beschreibung der beiden genannten experimentellen Fakten werden störungstheoretische QCD bzw. im Falle der LRG-Ereignisse störungstheoretische QCD und Regge-Pol-Modelle benutzt [18, 22, 38], wobei insbesondere die Impulsverteilung der Gluonen im klein- x_B -Bereich und die "Struktur des Regge-Pols" (Pomeron) parametrisiert werden [24, 25, 38, 26]. Unter der Annahme das man die Details der Dynamik kennt, werden zur Beschreibung der Streuprozesse Feynmangraphen höherer Ordnung summiert [18, 22], obgleich die Einzelheiten der Dynamik der im klein- x_B -Bereich dominierenden weichen Gluonen nicht bekannt sind.

Zusammen mit den fundamentalen Eigenschaften der Gluonen (direkte Gluon-

Gluon-Wechselwirkung, Nichterhaltung der Gluonenzahl) zeigt die beobachtete Gluondominanz [19], daß man es im klein- x_B -Bereich der tiefinelastischen Elektron-Proton-Streuung mit einem offenen, komplexen, dynamischen System miteinander wechselwirkender weicher Gluonen zu tun hat. Daher stellen sich die folgenden Fragen:

Sollte man das komplexe System der miteinander wechselwirkenden Gluonen nicht auch als komplexes System behandeln?

Was sind die farbneutralen Objekte, die sich in den LRG-Ereignissen [21] manifestieren? Kann man die beobachteten Eigenschaften dieser Objekte und ihre Entstehung im Rahmen der QCD verstehen?

Die Beantwortung der gestellten Fragen und sich daraus ergebender Konsequenzen sind Gegenstand dieser Arbeit.