

Chaos, Turbulenzen und kosmische Selbstorganisationsprozesse

Ulrich von Kusserow

Chaos, Turbulenzen und kosmische Selbst- organisationsprozesse

 Springer Spektrum

Ulrich von Kusserow
Bremen, Deutschland

ISBN 978-3-662-55894-2
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-55895-9>

ISBN 978-3-662-55895-9 (eBook)

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-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Verantwortlich im Verlag: Margit Maly

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Geleitwort

Das altgriechische Wort „Kosmos“ stand für die Ordnung und Schönheit der damals bekannten Welt. Es steht heute für das Universum oder auch Weltall, also für die Gesamtheit der beobachtbaren Materie und Strahlung in Raum und Zeit, angefangen bei Licht und den elementaren Teilchen (wie Elektronen, Neutrinos und Quarks), über die zusammengesetzten Teilchen (wie Protonen, Neutronen, Atome und Moleküle), weiter zu den Sternen mit ihren Planeten, Kometen und Asteroiden, bis hin zu den großräumigen Anordnungen von Millionen von Sternen, den spiralförmigen oder elliptischen Galaxien in ihren riesigen Galaxienhaufen. Überall im Universum erscheinen die Dinge wohlgeordnet, strukturiert und hinreichend langlebig, so dass wir sie erkennen, untersuchen und verstehen können. Doch woher kommt diese wundersame Ordnung? Wissenschaftler bemühen keinen Gott als Schöpfer des Universums, sondern vertrauen auf die inneren Kräfte und die Dynamik der Natur, deren gemeinsames Wirken es zu entschlüsseln gilt. Diese Kräfte, wie die allumfassende Gravitation, der Elektromagnetismus, die schwache Kraft (beim radioaktiven Zerfall) und die starke Kraft (zum Binden der Atomkerne), halten die Welt im Innersten zusammen und sind heute aufgrund der sehr erfolgreichen Forschungsergebnisse des vergangenen Jahrhunderts sehr gut bekannt und verstanden. Hat sich der Kosmos also selbst organisiert – und mit ihm auch das Leben? Wir wissen es noch nicht, doch viele Indizien sprechen dafür.

Schaut man genauer hin, so findet sich aber auch Chaos überall im Universum. Das altgriechische Wort „Chaos“ steht für die Unordnung und den Wirrwarr (die Turbulenz, von lateinisch „*turbare*“, drehen oder verwirren) in der Welt, sollte ursprünglich aber auch die klaffende, gähnende Leere des Raumes bezeichnen. Sind Kosmos und Chaos die zwei Gesichter des Uni-

versums? Chaos herrscht überall, der interplanetare Raum ist weitgehend leer, der Raum zwischen den Sternen ebenso, und der zwischen den Galaxien sogar gähnend leer. Riesige Leerräume erstrecken sich zwischen den hellen Galaxienhaufen, das haben die Kosmologen und Astronomen mit Hilfe moderner Großteleskope entdeckt. Die Materie im sehr Kleinen und in kosmischen Objekten ist in steter Bewegung und verhält sich besonders dynamisch. Dabei stoßen Teilchen mit hohen Geschwindigkeiten von Hunderten von Kilometern pro Sekunde zusammen, durchdringen ganze Galaxien auf wesentlich längeren Zeiträumen einander, kollabieren große Sterne und bilden Schwarze Löcher, und dabei verschlingen diese extrem kompakten Objekte die Materie innerhalb ihres Ereignishorizontes durch gewaltige Gravitationskräfte. Masse-reiche Sterne explodieren als Supernovae mit gewaltiger Strahlkraft, heller als das Licht einer ganzen Galaxie.

Rotierende Mahlströme von Materie bilden sich um die sehr viel Masse ansammelnden, akkretierenden kompakten Himmelsobjekte. In deren Umgebung wird für uns Menschen tödliche Gammastrahlung erzeugt, werden relativ leichte Teilchen auf fast 300.000 km/s, also auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Dabei spielt die verwirbelte Strömung des Plasmas, einem ionisierten, elektrisch leitfähigen Gas, in den Akkretionsscheiben der meistens auch magnetisierten Objekte eine große Rolle. Astrophysiker sprechen dann von einem turbulenten Magnetofluid, oder auch turbulentem Plasma, in dem starke elektromagnetische Kräfte wirken. Turbulente Strömungen und Wirbelstraßen hinter Steinen im fließenden Wasser von Bergbächen sind jedem irdischen Wanderer wohlvertraut, ebenso wie die Verwirbelungen der Luft hinter den Flugzeugen am wolkenlosen Himmel oder die eventuell turbulente dünne Luft in großer Flughöhe, die jeder Passagier so fürchtet. Auch viele dynamische astrophysikalische Prozesse sind von Turbulenz begleitet, und wie es scheint, ist Turbulenz darüber hinaus auch das Markenzeichen der selbstständigen Organisation von nicht kondensierter Materie in kosmischen Systemen. Aber selbst im kondensierten, sehr zähflüssigen und dichten Inneren der Planeten unseres Sonnensystems, ebenso wie in der heißen dünnen Konvektionszone der Sonne, gibt es starke Turbulenz, die mitwirkt bei der Entstehung von Magnetfeldern durch den Dynamoprozess. Kosmos und Chaos gehören offensichtlich zusammen, ebenso wie Selbstorganisation und Turbulenz. Das genau ist das Thema des vorliegenden Buches.

Der Autor spannt einen geradezu kosmischen Themenbogen, der von Chaos und Turbulenzen im Universum, über geordnete Strukturen und sich selbst organisierende kosmische Systeme, zu den Turbulenz- und Chaostheorien, über die Theorien zur Selbstorganisation, bis zu astrophysikalischen Strukturbildungsprozessen und schließlich bis zur Entwicklung des Lebens im

Universum reicht. Dabei kann er sich auf umfassende Beobachtungsdaten aus Observatorien, detaillierte Messergebnisse aus Forschungslaboren sowie auf die Theorien und Modelle, die Ergebnisse und tieferen Erkenntnisse der Astrophysiker, Geophysiker, Plasmaphysiker, Chemiker und Molekularbiologen stützen, die diese im Rahmen ihrer umfangreichen Forschungsarbeiten zur Astronomie, der Entwicklung des Lebens oder recht interdisziplinärer Themen gewonnen haben.

Sein reichhaltig bebildertes und durch viele eigene Graphiken anschaulich und attraktiv illustriertes Sachbuch hat das hehre Ziel, wissenschaftlich interessierte Laien zu begeistern und zu bilden, mögliche Studenten der Astrophysik anzulocken und zu motivieren, Wissenschaftler anderer Disziplinen zu informieren und über die verstandenen Phänomene und ungelösten Rätsel des Universums aufzuklären. Dabei propagiert der Autor Turbulenz und Selbstorganisation als zentrales und einigendes Paradigma, mit dem sich viele Prozesse und Entwicklungen in kosmischen Systemen erklären lassen. Darüber hinaus bietet er dem geneigten und kompetenten Leser in eingeschobenen Infokästchen und im Anhang auch zahlreiche Darstellungen der theoretischen Konzepte an, zusammen mit den mathematischen Gleichungen für die aktuellen physikalischen Modelle, die in der Wissenschaftsgemeinde zur Erklärung diskutiert werden und für ein tieferes Verständnis kosmischer Prozesse erforderlich sind. Diese wohlgemeinten Informationen darf der mathematisch nicht versierte Leser getrost übergehen, dem Fachmann oder Physiker aber mögen sie wertvolle Ergänzungen sein zu den vielen Bildern und ausführlichen Beschreibungen in diesem Buch.

In der Tat, atemberaubend und faszinierend sind die Bilder des tiefen Universums, gewonnen durch das Hubble-Weltraumteleskop, oder der Sterne und ihrer Entstehungsgebiete in Molekülwolken, die mit Hilfe großer Teleskope im Hochgebirge der Anden aufgenommen wurden. Ebenso beeindruckend sind die Bilder der Sonne im sichtbaren und ultravioletten Licht, die von zahlreichen Raumsonden im Weltraum erhalten wurden, oder der Planeten, ihrer Monde sowie der Kometen, ermöglicht durch viele erdferne Missionen der Weltraumagenturen, und schließlich die Bilder der Erdatmosphäre, aufgenommen durch Beobachtungssatelliten im erdnahen Weltraum. All diese Bilder sind über das Internet heute frei zugänglich, ihre Betrachtung und Verwendung zur Selbstverständlichkeit für die wissenschaftlich interessierte Gesellschaft geworden. Lieber Leser, nutzen Sie diese Möglichkeiten!

Das gilt ebenso für die etwas abstrakteren Erkenntnisse zum Beispiel über die Plasmen im Inneren und der Umgebung von Sternen, die Magnetosphäre unseres Planeten oder den turbulenten Sonnenwind, der von der Sonne abströmt und die sie umgebende Heliosphäre formt, die bis zum hundertfachen

Abstand der Erdbahn von der Sonne an das extrem dünne interstellare Medium heranreicht. Leider lassen sich diese aus in-situ-Messungen von Satelliten und Raumsonden gewonnenen Plasma-, Teilchen- und Magnetfeld-Daten nicht direkt bildhaft oder anschaulich darstellen. Die meisten Sterne, so glauben die Astronomen heute, bilden ihre eigenen Plasmasphären aus und geben die in ihnen unter anderem in Kernfusionsprozessen erzeugten schweren Elemente in Form von Sternenwinden in das sie umgebende kühle interstellare Medium ab. In diesem braut sich, auch mit Hilfe der Turbulenz, das gemischte Material zusammen, aus dem wir als Kinder der Sterne gemacht sind.

Woher kommt das Leben? Wie entstand es? Warum sind wir da? Sind wir allein oder stehen wir gar unter Beobachtung ferner intelligenter Wesen, die viel weiter als wir entwickelt sind. Was vor wenigen Jahren noch Gegenstand der Naturphilosophie und Science-Fiction war, steht heute im Fokus der beobachtenden astronomischen Forschung. Extrasolare Planeten sind jüngst in großer Zahl bei Weltraummissionen gefunden worden, und manche unter ihnen scheinen nach menschlichen Maßstäben sogar bewohnbar, habitabel zu sein. Je unwirtlicher aber die meisten dieser fernen Planeten aus anderen Sternenwelten zu sein scheinen, umso wohnlicher muss uns doch die Erde vorkommen, die wir in all ihrer Schönheit für selbstverständlich halten und von der wir glauben, dass die auf ihr sich entwickelnde Natur uns frei zur Nutzung überlassen ist.

Nein, „Macht Euch die Erde untertan“ darf in Zukunft nicht mehr die Devise sein! Auch dieses Thema liegt dem Autor sehr am Herzen. Deshalb berichtet er auch über den Stand unseres Verständnisses der Atmosphären extrasolarer Planeten und widmet ebenfalls erhebliche Teile seines Buches dem Thema der Atmosphäre und des Klimas auf der Erde sowie seinem gegenwärtigen Wandel ... wohl hin zum Schlechteren, so wie es trotz großer Anstrengungen von Klimaschützern heute aussieht. Schon hausen mehr als sieben Milliarden Menschen, meist in urbanen Ballungszentren und Megastädten, auf dieser Erde. Wie wird unser Leben hier auf dem Globus in einigen Jahrzehnten aussehen?

Warum in die Ferne schweifen, liegt das Gute doch so nah! Doch Zufriedenheit mit der Gegenwart ist trügerisch. Um die Bedingungen und Ursprünge, vielleicht auch den Sinngehalt unseres heutigen so wertvollen Lebens auf der Erde besser zu verstehen, müssen wir auf die historische Entwicklung unseres Planeten, der Biosphäre als unserem Lebensraum sowie der unterschiedlichen Lebensformen zurückblicken, die schließlich auch unser Leben möglich gemacht hat. Dies erfordert zusätzlich tiefere Erkenntnisse über Vorgänge bis hin zu den Anfängen des Universums, als der Stoff, aus dem wir bestehen, im Nachklang des Big Bangs, in den Sternen der ersten Genera-

tion, in zahlreichen Supernova-Explosionen, in den warmen Brutstätten der Sternentstehungsgebiete gemacht wurde. Nach Ausbildung unseres Sonnensystems begann die chemische und biochemische Evolution des Planeten Erde. In den unterschiedlichen Sphären dieses Erdsystems setzten sich die wichtigen anorganischen und organischen Moleküle zusammen. Klare Evidenz für deren Existenz findet man heute durch optische, Infrarot- und sub-Millimeter-Spektroskopie, durch Fernbeobachtung in den interstellaren Molekülwolken oder durch massespektroskopische Untersuchungen alten Kometenmaterials vor Ort.

Doch es bleibt ein sehr weiter Weg (den wir gern nachvollziehen wollen) vom groben organischen Baumaterial hin zur ersten Zelle und weiter zu primitiven Mehrzellern oder der heutigen komplexen Flora und Fauna, von der wir nur ein Teil sind, ohne die wir aber nicht existieren können. Raffinierte Ketten chemischer Reaktionen, die irgendwann die Ausbildung großer Moleküle – oft in zyklischer Form – selbst organisierten, waren offenbar notwendig und erfanden die kreative Natur, um dann eine ganze Zelle mit ihren Kraftzentren, den Möglichkeiten ihrer Teilung und der Vererbung ihrer Baupläne zu erzeugen. Wir sehen uns als „Krone“ dieser Schöpfung, doch wertschätzen wir nicht genug all das, was mit oder nach uns entstand oder schon lange vor uns existierte.

Dieses Buch bereitet kein leichtes, aber ein sehr lohnendes Lesevergnügen, und es wird sicher dazu beitragen, kosmische Zusammenhänge besser zu erkennen und tiefer zu verstehen sowie die Entwicklung und Struktur der unbelebten und belebten Materie im Universum zu verfolgen und zu analysieren, um dann am Ende eines Leseabenteuers mit frischem Erstaunen zum nächtlichen Himmel aufzublicken, zu den beeindruckend blinkenden Sternen, denen wir auch unsere Existenz verdanken.

Kiel, Juli 2017

Eckart Marsch

Prolog

*„Out of the chaos comes the order – Out of the darkness comes the light
Out of the Heavens, near the border – There shines a star tonight“*

„Aus dem Chaos entsteht die Ordnung, aus der Dunkelheit kommt das Licht, aus den Himmelsbereichen, nahe am Horizont, da scheint heute Nacht ein Stern.“ Dies sind die ersten Zeilen eines Liedes der britischen Folkrock-Gruppe „The Albion Band“ mit dem Titel „Light Shining“. Wie konnten die ersten, vermutlich besonders massereichen Sterne nach dem vermuteten Urknall in dem anfangs sehr wahrscheinlich extrem turbulenten Medium des noch jungen, tobenden Universums entstehen? Wie gelang die Strukturbildung der mehr oder weniger hierarchisch geordneten, großräumig verteilten kosmischen Himmelsobjekte, der riesigen Galaxienhaufen mit Leerräumen zwischen ihnen in charakteristischer Weise überwiegend spiralförmig geordneten oder elliptisch geformten Galaxien? Wie können sich, anders als die Galaxien selbst, auch heute noch immer wieder junge Sternhaufen in den turbulent verwirbelten Molekül- und Staubwolken in den Armen solcher Spiralgalaxien ausbilden? Und wie entstehen überall im Universum die offensichtlich so wohlgeordneten, dabei recht unterschiedlich organisierten Strukturen in ihrem doch eher chaotisch erscheinenden Umfeld?

Auf der Erde hat sich im Verlaufe von einigen Milliarden Jahren von uns als intelligent bezeichnetes Leben entwickeln können. Wir Menschen möchten nicht nur erfahren, unter welchen Bedingungen und im Verlauf welcher komplexen Wechselwirkungsprozesse sich die große Vielfalt der so beeindruckenden Himmelsobjekte im Laufe der kosmischen Evolution entwickelt hat. Um die Hintergründe auch unserer eigenen Existenz zu ergründen, wollen wir noch wesentlich tiefer verstehen, wie sich gerade unsere Sonne als sehr ge-

eignete Energiequelle sowie die Erde als passender Ort für die Entwicklung komplexer Lebensformen haben ausbilden können. Wie genau, und warum gerade auf unserem Planeten, entwickelte sich im Zusammenspiel der unterschiedlichen Sphären des Erdsystems eine geeignete Biosphäre, die die zeitliche Entwicklung besonders vielfältiger Lebensformen offensichtlich so förderlich unterstützt hat? Wie konnten nach Bildung der ersten Einzeller immer komplexere Mikroorganismen, die ersten Pflanzen, schließlich die Tiere und dann auch wir Menschen entstehen? Nicht nur die in den physikalischen, chemischen, biologischen oder geologischen Forschungsbereichen arbeitenden Wissenschaftler möchten die Grundlagen ihrer eigenen Existenz unbedingt erforschen. Seit Jahrtausenden wird die Frage nach der Entstehung des Lebens in allen möglichen Kulturkreisen gestellt und intensiv diskutiert.

Aber werden wir Menschen jemals die Entwicklung kosmischer Strukturen und das Wunder des Lebens rational begreifen und schließlich endgültig verstehen können? Wäre dies überhaupt generell erstrebenswert? Werden wir im Verlaufe unserer Erkenntnisgewinnung nicht immer wieder auch auf neue ungeklärte Probleme stoßen? Viele Menschen staunen ehrfürchtig über die überall anzutreffenden Wunder der Natur, spüren und akzeptieren mögliche Grenzen unserer menschlichen Fähigkeit, Erkenntnis zu gewinnen. Die Unvorhersehbarkeit weiterer Entwicklungen und unterschiedlichste Lebensereignisse können uns Menschen aber auch Angst machen. Ist es dann nicht nachvollziehbar und verständlich, dass viele Menschen in diesem Zusammenhang lieber davon ausgehen, dass es einen oder mehrere Götter geben müsste, die das Universum, aber auch all die Pflanzen, Tiere und uns Menschen geschaffen haben? Wären es dann nicht letztlich auch diese Götter, die für alle kosmischen und menschlichen Entwicklungen verantwortlich sind, denen wir uns mit unseren Sorgen anvertrauen könnten, bei denen wir Geborgenheit und Zuversicht für die Bewältigung vieler Probleme finden würden?

Wir erleben und würdigen das Wunder der Geburt sowohl in menschlichen als auch kosmischen Zusammenhängen. Wir betrachten fasziniert die sich filigran-strukturiert ausbreitenden, bizarren Überreste von Supernovaexplosionen am Ende des Lebens massereicher Sterne. Manche von uns fürchten aber den Tod am Ende ihres Lebens, obwohl der Tod ja grundsätzlich unvermeidlich ist und wie die Geburt einen essenziellen Vorgang innerhalb aller kosmischen Materie- und Lebenskreisläufe darstellt. Die sogenannten „Kreationisten“ machen es sich mit der Beantwortung existenzieller Frage allerdings allzu leicht, wenn sie allen gesicherten wissenschaftlichen Erkenntnissen widersprechend, beharrlich auf ihrer Meinung bestehen, dass unsere Welt erst vor wenigen tausend Jahren entstanden sei, und dass natürlich nur ein Gott eine solche Schöpfung vollzogen haben könne.

Wenn man allerdings den Naturwissenschaftlern, ihren wohlerprobten Forschungsmethoden und gesicherten Untersuchungsergebnissen vertraut, dann ist das Leben auf der Erde in seiner einfachsten Form bereits vor etwa 3,85 Mrd. Jahre entstanden. Im Südwesten Grönlands wurden in einem so alten Sedimentgestein erstmals Anomalien im Verhältnis unterschiedlicher Kohlenstoffisotope nachgewiesen, die auf die Existenz eines ersten biologischen Stoffwechsels hindeuten. Sehr viel gesichertere Lebensspuren, mögliche erste Bakterien konnten dagegen erst in 1,9 Mrd. Jahre alten Fossilien nachgewiesen werden. Für manche von uns stellt sich dennoch die bewegende Frage, ob das Universum, das Leben auf unserem Planeten, schließlich auch wir Mensch nicht doch durch eine, von einer Art Schöpfergott vermittelten wundersamen Prägung der Natur entstanden sein könnten, oder ob tatsächlich allein der Ablauf physikalischer, chemischer oder biologischer Prozesse selbstorganisierend ohne jede göttliche Fügung dafür verantwortlich ist.

Meist aus guten Gründen fürchten wir Menschen chaotische Zustände und allzu turbulente Entwicklungen in unserem Lebensumfeld. Wir wünschen uns oft eher geordnete Verhältnisse, organisieren zur Sicherheit lieber Entwicklungen, die möglichst schnell einen ausgewogenen Gleichgewichtszustand herbeiführen. Mehr oder weniger bewusst erleben wir allerdings überall im Alltag und in der Natur immer wieder auch sehr beeindruckende, unter Umständen auch recht bedrohliche turbulente Phänomene und Ereignisse. Wissenschaftler können heute nachweisen, dass sich sowohl das Universum als Ganzes als auch speziell das Leben in der Biosphäre der Erde über Milliarden Jahre hinweg schrittweise mehr oder weniger stetig entwickelt haben. In Richtung klar erkennbarer kosmischer Zeitverläufe entstehen und vergehen dabei immer wieder neue, emergente Strukturen. Im mathematisch deterministisch, das heißt wohlbestimmten Sinne chaotisch oder turbulent verlaufende, nichtlineare Rückkopplungsvorgänge sind es dabei häufiger, die auf eine allzu friedliche Evolution komplexer Systeme immer wieder „förderlich störend“ Einfluss nehmen können.

Solche dynamisch sich entwickelnden Systeme sind auf die ständige Zufuhr von Energie angewiesen. Weit entfernt von Gleichgewichtszuständen spielen dabei Dissipationsprozesse eine zentrale Rolle. Sowohl bei Turbulenzphänomenen als auch im Verlauf von Selbstorganisationsprozessen, die für die Entwicklung von Galaxien, Sternen, Planeten sowie des Lebens in dafür geeigneten Biosphären verantwortlich sind, bewirken solche Zerstreungsprozesse die Umwandlung hochwertigerer Energieformen in niederwertigere Wärmeenergie. Solche Dissipationsprozesse werden für den Abtransport der sogenannten Entropie verantwortlich gemacht, einer physikalischen Größe, durch die sich der Grad der Unorganisiertheit eines Systems beschreiben lässt. Auch wenn

Turbulenzen und Selbstorganisationsvorgänge auf den ersten Blick als sehr weisensfremd erscheinen mögen, so können diese aufgrund übereinstimmender charakteristischer Eigenschaften solcher in kosmischen Systemen ablaufender Szenarien dennoch als die zwei Seiten einer Medaille angesehen werden, die die Entstehungs- und Entwicklungsvorgänge in unserem Universum erst verstehen und erklären helfen. Turbulenz- und Selbstorganisationsprozesse laufen in meist offenen und dissipativen komplexen Systemen fern von Gleichgewichtszuständen durch nichtlineare Interaktionen zwischen einer Vielzahl von Systemelemente ab und bedingen sich wechselseitig.

Wir Menschen erleben in unserem täglichen Leben persönlich eine Vielzahl chaotischer Verhältnisse und turbulenter Entwicklungen. Turbulenzen sind es auch, die die Entwicklungsprozesse auf der Oberfläche, in den Ozeanen und in der Atmosphäre unseres Planeten treiben, die das deterministisch chaotische Verhalten des Wetters und unseres Klimasystems bestimmen. Im **ersten Kapitel** dieses Buches soll exemplarisch aufgezeigt werden, wie chaotisch und turbulent die unser Leben stark beeinflussenden Plasmaprozesse in der aufgeheizten Sonnenatmosphäre sowie im magnetisierten Sonnenwind verlaufen können. Turbulenzen prägen nicht nur die frühen Entwicklungsphasen aller Stern- und Planetensysteme. Sie unterstützen unter anderem auch die Nukleosynthese lebenswichtiger chemischer Elemente und dominieren hochenergetische Prozesse vor allem auch am Ende des Sternenlebens. Galaktische Turbulenzen verwirbeln das magnetisierte interstellare Medium in der Milchstraße, in aktiven Galaxienkernen und kollidierenden Galaxienhaufen.

Dieses Kapitel beginnt mit einer Darstellung der unterschiedlichen Bedeutungen des Chaos- und Turbulenzbegriffs in unserem täglichen Umfeld. Es geht dabei unter anderem um die negativen und positiven Eigenschaften von Turbulenzen beispielsweise im Flugverkehr, um die Notwendigkeit der Reduzierung von Turbulenzen aus ökonomischen und ökologischen Gründen oder um die mögliche Rolle von Turbulenzen im Zusammenhang mit Wolkenbildungsprozessen. Im folgenden Abschnitt werden die großräumigen Chaos- und Turbulenzerscheinungen in unserem Erdsystem betrachtet. Es werden die Auswirkungen von Naturkatastrophen beschrieben, die Folgen der turbulenten Verwirbelungen von Meeresströmungen und Atmosphärenschichten betrachtet. Es geht um deren Einfluss auf die Wetter- und Klimaverhältnisse, um die Auswirkungen des durch den Sonnenwind vermittelten turbulenten Weltraumwetters in der Magnetosphäre und Ionosphäre unseres Planeten. Danach werden diverse weitere Chaos- und Turbulenzerscheinungen in unserem Sonnensystem vorgestellt. Turbulenzen unterstützen die Erzeugung solarer Magnetfelder in Dynamoprozessen. Sie sind für die Aufheizung der Son-

nenatmosphäre verantwortlich, treiben und modulieren die Beschleunigungs- und Strömungsprozesse im Sonnenwind.

Turbulenzen bestimmen die Durchmischungsprozesse im interplanetaren, interstellaren und intergalaktischen Raum. Turbulente Verwirbelungen können die Sternentstehung anfangs zwar behindern. Ohne sie wäre die Massezunahme eines jungen Protosterns durch Materiezustrom aus der ihn umgebenden Akkretionsscheibe andererseits aber gar nicht erst möglich. Im folgenden Abschnitt dieses Kapitels werden die positiven und negativen Auswirkungen turbulenter Prozesse im Zusammenhang mit der Ausbildung und Entwicklung von Sternen mit ganz unterschiedlicher Masse beschrieben und anhand umfangreichen Bildmaterials veranschaulicht. Da geht es um die Turbulenzeinflüsse im interstellaren Medium, in der Frühphase der Sternentstehung sowie um die besonders turbulenten Sternentwicklungsprozesse insbesondere auch am Ende des Lebens besonders massereicher Sterne. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels werden schließlich auch die unterschiedlichen Erscheinungsformen galaktischer Turbulenzen vorgestellt. Dabei geht es um die Turbulenzen in der Umgebung unserer Milchstraße, im Umfeld aktiver Galaxienkerne sowie bei der Kollision riesiger Galaxienhaufen.

In einem turbulenten kosmischen Umfeld ermöglichen komplexe, nicht-lineare Prozesse die wie von selbst organisierte Ausbildung wohlgeordneter Strukturen in Galaxien-, Stern- und Planetensystemen, letztlich auch die Entwicklung von Leben in der Biosphäre unseres Planeten. Im **zweiten Kapitel** dieses Buches werden zunächst diese engen Wechselbeziehungen zwischen verbreitet wirksamen kosmischen Turbulenzen und Selbstorganisationsvorgängen erläutert. Es folgt eine ausführlichere Darstellung möglicher kosmischer Entwicklungsszenarien nach dem sogenannten Urknall. Die frühe galaktische Architektur des Weltalls sollte danach durch die Entstehung, Entwicklung und Explosion erster besonders massereicher Sterne sowie die Ausbildung anfangs noch relativ einfach geformter Protogalaxien gekennzeichnet sein. Durch Materieakkretion müssten mittelschwere Schwarze Löcher, die sich in den Zentralbereichen solcher Protogalaxien mit der Zeit ausbilden, zunehmend an Masse gewinnen. Neben den anfangs besonders stark dominierenden Gravitationskräften könnten möglicherweise auch erste primordiale Magnetfelder eine nicht unwichtige Rolle für die Strukturbildung in diesen rotierenden, ersten kosmischen Systemen gespielt haben. Die heute mit hochauflösenden Teleskopen beobachtbaren Zusammenstöße solcher frühen Zwerggalaxien führten in den ersten Milliarden Jahren nach dem Urknall schließlich zur Ausbildung wohlgeordneter, zunehmend komplexer strukturierter und großräumiger galaktischer Strukturen. Es werden in diesem Zusammenhang die Grundlagen der galaktischen Selbstorganisationsprozesse

se, die Vielfalt der Galaxientypen sowie die strukturbildenden Vorgänge bei galaktischen Kollisionsprozessen erläutert.

Die in charakteristischen Scheibe-Jet-Strukturen um kompakte Himmelsobjekte ablaufenden, im Rahmen einer allgemein anerkannten paradigmatischen Lehrmeinung analysierbaren physikalischen Prozesse spielen für die Entwicklung ganz unterschiedlicher Himmelsobjekte überall im Universum eine zentrale Rolle. In diesem Kapitel werden die Eigenschaften solcher Strukturen erläutert, die sich um galaktische Kerne, in jungen Protosternsystemen sowie am Ende des Lebens eher massereicher Sterne ausbilden. Materieakkretion gelingt in solchen Systemen durch Turbulenzbildung innerhalb flacher Scheibenstrukturen und durch den Abtransport von Drehimpuls auch in unterschiedlich stark kollimierten kosmischen Winden. Es werden abschließend die in unserem eigenen Sonnensystem anzutreffenden sehr charakteristisch geordneten, sich selbstorganisiert entwickelnden Strukturen vorgestellt. Die Planeten umlaufen die Sonne auf elliptischen Bahnen in einem nahezu scheibenförmigen Planetensystem, und Monde, Eis- und Gesteinsbrocken umkreisen den Gasriesen Saturn in einem ebenfalls sehr wohlorganisierten Ringsystem. Die unterschiedlichsten magnetischen Prozesse entwickeln sich im Innern und in der Atmosphäre der Sonne recht periodisch im Verlaufe solarer Aktivitätszyklen. Eine Vielzahl von Selbstorganisationsprozessen bestimmt die Entwicklung des Klimas und unseres Lebens im Erdsystem.

Auch wenn Menschen mit Chaos- und Turbulenzphänomenen häufiger eher etwas Ungutes verbinden, so ermöglichen die im Zusammenhang mit diesen beiden Begriffen von Wissenschaftlern entwickelten Theorien erfreulicherweise doch tiefere Erkenntnisse über sehr wichtige kosmische Entwicklungsprozesse. Basierend auf einer relativ klaren Definition lassen sich für das deterministische Chaos sehr wohl allgemeingültige Regeln aufstellen, die pauschale Entwicklungstendenzen zumindest von Systemen mit einer geringen Anzahl von Freiheitsgraden zulassen. Für die sehr viel komplexeren Turbulenzphänomene haben die Wissenschaftler unterschiedliche Theorien entwickeln müssen, je nachdem, ob das jeweils betrachtete verwirbelte Medium aus nur wenigen und nur sehr selten miteinander kollidierenden Partikeln besteht, oder ob es vereinfachend als ein aus unzählbar vielen Teilchen zusammengesetztes Fluid betrachtet werden kann. Da die Materie im Universum außerdem fast überall in Form eines elektrisch leitfähigen Plasmas vorliegt, können elektrische und vor allem magnetische Felder eine sehr entscheidende Rolle für die Ausbildung, Entwicklung und Dissipation turbulent verwirbelter Systeme spielen.

Das **dritte Kapitel** dieses Buches vergleicht zu Beginn die Begriffe Chaos und Turbulenz, beispielsweise im Bereich der Kunst, und beschreibt die

Anfänge von Turbulenzforschung und Chaostheorie. Es stellt die unterschiedlichen Turbulenztheorien vor und konstatiert die generelle Unmöglichkeit der Entwicklung einer wirklich einheitlich fundamentalen Turbulenztheorie. Ausführlicher wird danach die klassische Turbulenz im Bereich neutraler Fluide behandelt. Es werden unter anderem unterschiedliche Möglichkeiten der Turbulenzerregung veranschaulicht, die berühmten Kolmogorow'schen Turbulenzgesetze im Rahmen der Hydrodynamik für Fluide mathematisch aufbereitet sowie die vielfältigen Möglichkeiten zur Vermessung und statistischen Analyse von Turbulenzfeldern aufgezeigt. Im Anschluss daran werden die Grenzen der Naturerkenntnis in einem ersten Abschnitt zur Theorie des deterministischen Chaos beschrieben. Es werden die Grundlagen der Chaostheorie erläutert. Da geht es um die Bedeutung der Nichtlinearität chaotischer Systeme, um Begriffe wie Trajektorien und Attraktoren im Phasenraum sowie um den fraktalen Lorenz-Attraktor. Anhand sogenannter Feigenbaum-Diagramme lassen sich die Ordnungs- und intermittenten Strukturen diskutieren, die Wissenschaftler im Rahmen ihrer Forschungsarbeiten zur Populationsdynamik gefunden haben und die sich auf einem sogenannten Weg der Periodenverdopplung ins Chaos zu erkennen geben. Es wird abschließend diskutiert, wie eng die Verwandtschaftsbeziehungen zwischen Chaos und Turbulenz tatsächlich sind.

Im Folgenden werden zunächst die Erkenntnisse über Turbulenztheorien für elektrisch leitfähige und magnetisierte Medien wie metallische Fluide sowie Plasmen vorgestellt, in denen die Materiedichte relativ hoch ist, so dass direkte Stoßprozesse zwischen den Teilchen in der Regel eine zentrale Rolle spielen. In solchen Medien lassen sich Turbulenzen durch unterschiedliche Modellansätze im Rahmen der Magnetohydrodynamik (MHD) mathematisch-physikalisch analysieren. Anders als im Fall klassischer Turbulenztheorien für neutrale Fluide, bei denen Verwirbelungsstrukturen ganz unterschiedlicher Abmessungen und Geschwindigkeiten als anschaulich interpretierbare Turbulenzelemente modellhaft Verwendung finden, gelingt die Interpretation von Turbulenzvorgängen im Rahmen der MHD bildhaft anschaulich ergänzend vor allem auch anhand der Ausbreitung und Wechselwirkung meist magnetisierter Wellenmoden. Die Ausbildung von Wellenpaketen unterschiedlichster Abmessungen wird auf großen Längenskalen angeregt. Fortlaufende Kollisionsprozesse sorgen dann dafür, dass die Energie kaskadenförmig auf Wellenpakete mit verringerten Abmessungen übertragen wird, bis schließlich Dissipationsprozesse auf genügend kleinen Längenabmessungen einsetzen und die Dämpfung der Turbulenzen bewirken.

Im Rahmen kinetischer Theorien werden danach die Turbulenzvorgänge in den extrem ausgedünnten kosmischen Plasmen betrachtet, die überwiegend in

den Bereichen zwischen Galaxien, Sternen und Planeten anzutreffen sind. Da geht es insbesondere auch um die Entwicklung von Plasmaturbulenzen im Umfeld der Sonne, um die Ausprägung der im Sonnenwind nachweisbaren, charakteristischen magnetischen Energiespektren. Es werden spezielle Welle-Welle- und Welle-Teilchen-Wechselwirkungsprozesse vorgestellt, die die Stoßprozesse und damit auch die Ausbreitung und Dämpfung von Turbulenzen in den nahezu kollisionsfreien, elektrisch leitfähigen und magnetisierten Medien erst ermöglichen. Als Rekonnexion bezeichnete magnetische Neuverbindungsprozesse innerhalb elektrischer Stromschichten können die Dissipation turbulenter Energie dabei in effektiver Weise unterstützen.

Im **vierten Kapitel** dieses Buches werden grundlegende Theorien zur Selbstorganisation vorgestellt und detaillierter erläutert. In ganz unterschiedlichen Zusammenhängen erleben und registrieren wir Menschen Entwicklungen und Phänomene, die durch die Ausbildung überraschend geordneter und sehr variabel organisierter Strukturen in Umgebungen geprägt sind, die anfangs chaotisch und turbulent verwirbelt erscheinen. Seit der Antike erforschen Naturphilosophen und Wissenschaftler die Hintergründe dieser überall im Universum beobachtbaren Szenarien und bemühen sich, solche Selbstorganisationsprozesse anhand übergeordneter Konzepte zu erklären. Die Entwicklung grundlegender Theorien erfordert die Zusammenstellung typischer Charakteristika vieler selbstorganisierter Systeme, eine möglichst verbindliche Definition des Selbstorganisationsbegriffs sowie tiefere wissenschaftliche Erkenntnisse über die in solchen Systemen allgemeingültig wirksamen zentralen Funktionsprinzipien.

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden unsere Erfahrungen und Erkenntnisse über die in der Natur ablaufenden Selbstorganisationsprozesse beschrieben. Es wird die Vielfalt solcher sich überall im Universum selbst regulierender kosmischer Organisationsprozesse sowie die Notwendigkeit und Bedeutung ihrer Erforschung aufgezeigt. Um die historische Entwicklung des Begriffs sowie der Erforschung von Selbstorganisationsprozessen geht es im folgenden Teil. Überblickartig werden sowohl antike als auch neuzeitliche Konzepte zur Selbstorganisation vorgestellt. Da geht es unter anderem um nichtlineare Organisationsprozesse in offenen, dissipativen Systemen fern von Gleichgewichtszuständen, um die Selbststrukturierung von Materie und Natur sowie um Konzepte zur Selbstorganisation des Lebens auf unserem Planeten. Im folgenden Abschnitt werden exemplarisch typische Strukturbildungsprozesse in Fluiden vorgestellt, die sich wie selbstorganisiert entwickeln.

Im Abschnitt über zentrale Prinzipien der Selbstorganisation wird zunächst der Entropiebegriff im Zusammenhang mit dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik erläutert. Im Folgenden geht es um die Möglichkeit der Selbstor-

ganisation in dissipativen Strukturen, wie sie von Ilya R. Prigogine in den 1970er-Jahren vorgeschlagen wurde. Danach werden die grundlegenden Prinzipien des von Hermann Haken Anfang der 1960er-Jahre eingeführten Synergiebegriffs beschrieben. Dabei geht es um Ordnungsparameter, die aufgrund eines sogenannten Versklavungsprinzips die Ausbildung selbstorganisiert verlaufender Prozesse erzwingen. Anschließend werden katalytisch bzw. autokatalytisch, sogar hyperzyklisch ablaufende Kreisprozesse vorgestellt, die selbstorganisiert die Ausbildung von Reaktionsprodukten ermöglichen, die für die Entwicklung des Lebens im Universum von großer Bedeutung sind. So ermöglichen Kernfusionsprozesse im Rahmen des unter anderem von Carl Friedrich Freiherr von Weizsäcker 1939 entdeckten CNO-Zyklus die Erzeugung von Energie in Sternen. Die in dem von Melvin Calvin in den 1950er-Jahren entdeckten Zyklus ablaufende Kette chemischer Reaktionen produziert Zuckermoleküle aus Kohlendioxidmolekülen in allen, Photosynthese betreibenden Lebewesen. Und der Ablauf eines mehrstufigen, von Manfred Eigen 1977 postulierten Hyperzyklus wird als Erklärungsmöglichkeit für die präbiotische Entstehung replikativer chemischer Systeme angesehen. Abschließend werden die allgemeinen Charakteristika selbstorganisierter Systeme im Überblick noch einmal zusammengestellt.

Im **fünften Kapitel** dieses Buches werden drei wichtige astrophysikalische Strukturbildungsszenarien ausführlicher beschrieben, bei denen sowohl turbulente als auch Selbstorganisationsprozesse eine zentrale Rolle spielen. Da die fast überall im Universum anzutreffenden elektrisch leitfähigen Plasmen meist von Magnetfeldern durchsetzt sind, stellt sich zum einen die Frage nach den sich selbst regulierenden Mechanismen, die für die Entstehung und Entwicklung dieser Felder verantwortlich sind. Da der Aufbau und die Entwicklung strukturierter galaktischer Systeme vor allem unter dem Einfluss stellarer Entwicklungsprozesse erfolgt, sollte andererseits auch geklärt werden, ob und wie sich diese beiden offensichtlich selbstorganisiert ablaufenden Entwicklungsszenarien wechselseitig bedingen könnten. Und da sich für uns Menschen die existenzielle Frage nach der Entstehung des Lebens stellt, wäre es schließlich sehr wünschenswert, erst einmal die Ausbildung und Entwicklung von Planetensystemen tiefer zu verstehen.

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels geht es um die unterschiedlichen Eigenschaften und speziellen Organisationsformen kosmischer Magnetfelder. Es wird erklärt, wie Turbulenzen die Generierung sowohl verwirbelt kleinskaliger als auch wesentlich geordneterer großskaliger Magnetfelder in unterschiedlichen Dynamoprozessen unterstützen, wie die für das Einsetzen magnetischer Induktionsprozesse erforderlichen Saatfelder möglicherweise bereits in der Frühzeit des Universums mit Hilfe kosmischer Batterien erzeugt werden

konnten. Ausführlicher werden die Selbstorganisationsprozesse erläutert, die den Aktivitätszyklus der Sonne treiben, die die Entstehung planetarer Magnetfelder ermöglichen. Neben Modell- und Simulationsrechnungen zur Dynamotheorie werden auch die Ergebnisse kontrolliert ablaufender kosmischer Laborexperimente vorgestellt, mit Hilfe derer sich ein tieferes Verständnis magnetischer Selbstorganisationsprozesse gewinnen lässt.

Im folgenden Abschnitt werden die meist zyklisch erfolgenden, sich bildhaft wie Viren ausbreitenden Sternbildungstendenzen dafür verantwortlich gemacht, dass sich die beobachtbaren charakteristischen Organisationsformen innerhalb der Galaxien ausbilden können. Es sind die besonders massereichen und sehr aktiven Sterne, die mit ihrer Leuchtkraft und ihren Sternwinden das besondere Erscheinungsbild vor allem der beeindruckenden, riesigen Spiralgalaxien prägen. Ausführlicher werden in diesem Zusammenhang die unterschiedlichen Dichtewellentheorien vorgestellt, mit deren Hilfe sich die Ausbildung relativ geordneter galaktischer Spiralarms befriedigend erklären lässt. Gelöst werden müsste das stellar-galaktische „Henne-Ei-Problem“. Vermutlich waren es weder allein die ersten Sterne noch die die ersten Galaxien, die die Bildung früher großräumigerer kosmischer Strukturen ermöglicht haben. Nur gemeinsam in einem komplexen Systemverbund ist ihnen dies offensichtlich gelungen. In ganz unterschiedlichen stellaren und galaktischen Zusammenhängen spielen darüber hinaus auch spezielle Selbstorganisationsprozesse eine zentrale Rolle, die in auffallend übereinstimmender Weise in diversen magnetisierten Scheibe-Jet-Strukturen um jeweils relativ kompakte Zentralobjekte ablaufen. Materietransportprozesse in den Scheibenstrukturen in Richtung zum jeweiligen Zentralobjekt können dabei nur dann stattfinden, wenn das Scheibenmaterial nach Einsetzen von Instabilitäten turbulent verwirbelt wird und der Drehimpuls in der Scheibe nach außen oder in Form mehr oder weniger gebündelter Materiewinde aus dem System abgeführt werden kann. Es wird erläutert, wie die Beschleunigung und Kollimation jetartiger Winde erfolgen kann.

Im dritten Abschnitt dieses Kapitels wird eine Vielzahl physikalischer Prozesse beschrieben, die die Entstehung unterschiedlichster Planetensysteme ermöglichen. Nach historischen Anmerkungen zur Entwicklung des heliozentrischen Weltbildes sowie zur Existenz extrasolarer Planetensysteme werden die auffallend besonderen Eigenschaften vieler inzwischen entdeckter Exoplaneten vorgestellt. Die teilweise drastischen Abweichungen ihrer Charakteristika von denen der Planeten unseres Sonnensystems erforderten in den vergangenen beiden Jahrzehnten neue, erweiterte Theorieansätze zur Planetenbildung. Im Rahmen eines ersten Themenschwerpunktes werden zunächst neuere Erkenntnisse zur Staubbildung und Entstehung kilometergroßer Planetesimale

als Bausteine für die Planetenbildung in den protoplanetaren Scheiben vorgestellt. Mit Hilfe des sogenannten Grand-Tack-Modells lässt sich danach die frühe Entwicklung des inneren Sonnensystems erklären. Es werden in diesem Zusammenhang auch unterschiedliche Entstehungstheorien für das Erd-Mond-System diskutiert. Das sogenannte Nizza-Modell ermöglicht schließlich zufriedenstellende Erklärungen für die späteren Migrationsbewegungen der Gas- und Eisriesenplaneten im äußeren Sonnensystem. Es werden die sich dabei ergebenden Auswirkungen des späteren Bombardements von Planetesimalen auf die gesteinsartigen inneren Planeten und Monde erläutert und die mögliche Herkunft des lebenswichtigen Wassers diskutiert. Am Ende dieses fünften Kapitels geht es um die Entstehungsursachen sowie die Eigenschaften der unterschiedlichen Planetenatmosphären unseres Sonnensystems, abschließend speziell auch um die der Erdatmosphäre.

Die Erdbiosphäre ist für uns Menschen der einzige Ort im Universum, an dem wir die Existenz und Entwicklung von Leben nachweisen und persönlich erleben können. Um die Grundlagen der Evolution kosmischen Lebens zumindest auf unserem Planeten erforschen und verstehen zu können, bedarf es einer verbindlichen Definition des Lebensbegriffs sowie der gründlichen Analyse der erforderlichen Bedingungen für die Entstehung und historische Entwicklung des Lebens. Das **sechste Kapitel** dieses Buches beginnt Überblickartig mit einer Darstellung der essenziellen Grundlagen für die Evolution des Lebens. Im Folgenden werden die möglichen Auswirkungen des von der Sonne bestimmten Weltraumwetters auf unsere menschlichen Lebensgemeinschaften beschrieben. Im Rahmen ausführlicherer Darstellungen der biochemischen Grundlagen für die Lebensentwicklung werden zunächst die geeigneten Orte und notwendigen Bedingungen für die frühe Entstehung des Lebens auf der Erde vor etwa zwei Milliarden Jahren vorgestellt. Danach geht es um den Aufbau von Makromolekülen als wesentliche biochemische Lebensbausteine, die Zellatmung sowie energetische Stoffwechselprozesse, schließlich um die Entwicklung diverser Zellstrukturen. Im Laufe der Zeit müssen komplexe Rückkopplungsprozesse zwischen den unterschiedlichen Systemelementen des Lebens selbstorganisiert für die Emergenz immer höher entwickelter Lebensformen gesorgt haben.

Die Lebensentwicklung auf unserem Planeten wurde immer wieder durch die im Erdsystem wirksamen Stoff- und Energiekreisläufe sowie durch besonders günstige Klimaentwicklungen unterstützt und gefördert. Im folgenden Abschnitt dieses Kapitels werden in diesem Zusammenhang unter anderem die zyklischen Wasser-, Kohlendioxid-, Kohlenstoff-, Sauerstoff-, Kalium-, Phosphor- und Schwefelkreisläufe vorgestellt sowie deren jeweils spezielle Bedeutungen für die Entwicklung des Lebens erläutert. Danach erfolgt eine

Darstellung des Erdsystems als Wärmekraftmaschine, die Auflistung seiner Energiekreisläufe und deren Quellen. Es werden die unterschiedlichen astrophysikalischen, geologischen und anthropogenen Einflussfaktoren für das Erdklima sowie dessen Veränderungen beschrieben. Im letzten Abschnitt werden schließlich die Wachstumsgrenzen unseres Lebensraums auf der Erde aufgezeigt. Wir Menschen sind für die zunehmende Abstrahlung unseres „thermischen Mülls“ verantwortlich, und der Ausbau regenerativer Energien wird in Zukunft auch seine Grenzen haben. Unkontrolliertes, quantitatives Wachstum in ganz unterschiedlichen Zusammenhängen wird die Lebensbedingungen auf unserem Planeten nicht nur für uns Menschen in Zukunft zunehmend verschlechtern.

In diesem Buch soll die große Bedeutung der sehr vielfältigen und in ganz unterschiedlichen Zusammenhängen wirksam werdender Einflussfaktoren sowohl turbulenter als auch sich selbst organisierender Prozesse erläutert werden, die alle Strukturbildungs- und Entwicklungsvorgänge in unserem Universum möglich gemacht haben. Die anschaulichen Erklärungen der in diesem Zusammenhang relevanten Theorien und Modelle, die Bewertung umfangreicher Beobachtungs- und Messergebnisse sowie der Resultate von Modell- und numerischen Simulationsrechnungen ermöglichen dabei tiefe Einblicke in die wesentlichen Grundlagen der wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung. Turbulent getriebene, nichtlineare und dynamische Rückkopplungsprozesse in komplexen, durch stetigen Energie-, Materie- und Informationsaustausch mit der jeweiligen Umgebung charakterisierten offenen Systeme fern von Gleichgewichtszuständen sind es, die auch die Evolution unseres Lebens auf der Erde möglich gemacht haben.

„Es sind die gleichen ordnenden Kräfte, die die Natur in allen ihren Formen gebildet haben und die für die Struktur unserer Seele, also auch unseres Denkvermögens verantwortlich sind.“

Werner Heisenberg, Der Teil und das Ganze

Ergänzendes, aktualisiertes Text- und Bildmaterial zum Buch wird zukünftig auf der Seite <https://ulrich-von-kusserow.de/index.php/buecher> im Internet veröffentlicht.

Die QR-Codes unter den Abbildungen, die mithilfe von Smartphones oder Tablet-PCs mit geeigneter Software-Applikation gelesen werden können, weisen auf die Bildmaterialien, Animationen und Videos, die auch über die jeweils angegebenen Internetadressen zugänglich sind.

Danksagungen

„Auf der Suche nach einer Theorie der Turbulenz, halten wir vielleicht Ausschau nach einer Chimäre [... einer Art Feuer speienden Ungeheuers mit drei Köpfen]“ – war die Auffassung des britischen angewandten Mathematikers und Mitbegründers der Fluidodynamik Philip G. Saffman (1931–2008). Bereits 1985 hatte Andrei Nikolajewitsch Kolmogorow (1903–1987) erkannt, dass wohl wenig Hoffnung für die Entwicklung einer reinen, geschlossenen Theorie bestehen würde. Und: „Wenn ich Gott begegne, werde ich ihm zwei Fragen stellen: Warum Relativität und warum Turbulenz? Ich glaube wirklich, dass er eine Antwort [nur] auf die erste haben wird“ soll angeblich der deutsche Quantenphysiker Werner Heisenberg (1901–1976) auf seinem Totenbett gesagt haben. „Jeder Aspekt der Turbulenz ist umstritten“ und „Manchmal versehen uns Experimente mit so schönen und klaren Ergebnissen, dass es eine Schande für Theoretiker ist, dass sie sie nicht interpretieren können“, meinten noch 2003 der amerikanische Ozeanograph Rick Salmon sowie der russische Mathematiker und Strömungsforscher Viktor I. Judowitsch.

Kein Wunder also, dass auch ich als Physiker vom Turbulenzproblem schon immer tief beeindruckt war und unbedingt genauer wissen wollte, warum dieses Problem von führenden Wissenschaftlern letztlich als nahezu unlösbar eingestuft wurde und auch heute immer noch wird. Wir Menschen beobachten zwar persönlich immer wieder drastische Auswirkungen von Turbulenzen, und nicht nur die Astrophysiker registrieren deren wichtigen Einfluss in sehr unterschiedlichen kosmischen Zusammenhängen. Die Turbulenzforscher gewinnen dabei direkt oder indirekt umfangreiches Datenmaterial in einer Vielzahl von Experimenten sowie durch Vermessung unterschiedlichster Himmelsobjekte im Weltall und werten dieses Material im Rahmen statistischer Theorien auch recht erfolgreich aus. Aber auch wenn die Durchführung

analytischer Modell- und numerischer Simulationsrechnungen heute zunehmend tiefere Erkenntnisse über kosmologische und astrophysikalische sowie die Entwicklung von Leben im Universum betreffende Prozesse ermöglicht, so werden sich die unterschiedlichen Turbulenzphänomene aufgrund der Nichtlinearität der zugrundeliegenden Probleme doch nicht im Rahmen einer allgemeingültigen, einheitlichen Turbulenztheorie dahingehend analysieren lassen, dass in jedem Fall verlässliche, detaillierte Vorhersagen möglich werden.

Wie dankbar bin ich in diesem Zusammenhang vor allem Eckart Marsch, der mir in den letzten Jahren wesentlich tiefere Einblicke in die so komplexe Welt der Turbulenzforschung ermöglicht hat. Im Rahmen häufiger endloser Telefongespräche, während unserer regelmäßigeren Treffen sowie beim gemeinsamen Besuch eines internationalen Workshops zur Plasmaturbulenz im Sonnensystem haben wir die unterschiedlichsten Aspekte der Turbulenzphänomene und Theorien so ausführlich diskutiert, dass ich sie zumindest überblickartig und hoffentlich für Leser einigermaßen anschaulich und zusammenhängend in diesem Buch zusammentragen konnte. Lieber Eckart, ich freue mich vor allem darüber, dass wir „basierend auf der Turbulenz“ zu echten Freunden geworden sind. Besonders herzlichen Dank auch dafür, dass du den gesamten Text gelesen und in Ansätzen korrigiert hast, dass du mir insbesondere in den Kapiteln über die Turbulenztheorien und die postulierten Entwicklungen im frühen Universum wertvolle Anregungen gegeben und zielführende Verbesserungsvorschläge gemacht hast. Ich finde Dein Vorwort zu diesem Buch besonders gelungen, weil es überblickartig zusammenfassend und sehr präzise den gesamten Inhalt, aber auch die von mir gewünschte Zielsetzung sowie die Besonderheiten dieses Buches treffend beschreibt. Ich habe nicht nur über den Sonnenwind sehr viel von dir gelernt, weil du alles so geduldig, anschaulich und kompetent erklären kannst.

Ich habe mich sehr darüber gefreut, dass ich mit Rainer Beck, Christian Fendt, Jürgen Blum und Willy Kley sowie Christian Mayer zusätzlich anerkannte Wissenschaftler gefunden habe, die trotz größerer Arbeitsbelastungen in ihren Instituten in Bonn, Heidelberg, Braunschweig und Tübingen sowie Duisburg-Essen bereit dazu waren, die Texte jeweils zu den speziellen Themenbereichen Galaxien, Scheibe-Jet-Systeme, Planetenentstehung sowie Lebensentwicklung gründlicher zu lesen und in häufiger Rücksprache mit mir auch zu korrigieren. Ganz, ganz herzlichen Dank für all eure Bemühungen. Dies gilt auch für Robi Banerjee und Marcus Brügggen sowie Silke Britzen, die ich zu Gesprächen über Turbulenzen im frühen Universum bzw. in kosmischen Jets in Hamburg und Bonn getroffen habe. Einen verspäteten Dank auch an Heinz-Otto Peitgen in Bremen, in dessen brillanten mathematischen

Vorlesungen über die Chaostheorie ich vor etwa 30 Jahren so viel Spannendes erfahren konnte.

In den vergangenen 30 Jahren habe ich eine Vielzahl astrophysikalischer Vorträge gehalten, Artikel geschrieben, über ein Jahrzehnt hinweg zudem auch die regelmäßig stattfindenden Hauptvorträge bei der Bremer Olbers-Gesellschaft betreut, zu der immer wieder Astrophysiker aus den unterschiedlichsten deutschen Instituten eingeladen wurden. Ich habe mich in diesen Zusammenhängen schwerpunktmäßig mit der Sonnenphysik und kosmischen Magnetfeldern, der Entstehung und Entwicklung von Sternen sowie der des Lebens auf unserem Planeten beschäftigt. Auf Tagungen und bei Institutsbesuchen habe ich mich über diese Themenbereiche ausführlicher informiert und mit sehr vielen Wissenschaftlern diskutiert, denen ich sehr dankbar dafür bin, dass sie mir immer wieder die Möglichkeit dazu gegeben haben. Im Zusammenhang mit diesem Buch möchte ich insbesondere Frank Stefani vom Helmholtz-Zentrum in Dresden-Rossendorf sowie dem Didaktiker Oliver Schwarz von der Universität Siegen danken, mit denen ich in den letzten Jahren viele spannende Gespräche geführt habe. Dank auch an den Mathematiker Miloslav Druckmüller von der Universität in Brünn, der mich immer wieder mit fantastischen Bildern von der Sonne versorgt, sowie an Alfredo Macias von der Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, der mich 2015 zu Vorträgen unter anderem auch über Turbulenz und Selbstorganisation nach Mexiko eingeladen hat. Hier hatte ich ausreichend Gelegenheit, mir über die tieferen Zusammenhänge zwischen chaotischen und turbulenten Prozessen sowie ordnenden Strukturbildungs- und Selbstorganisationsprozessen zu machen.

Mein besonderer Dank gilt aber auch Stefanie Adam, Margit Maly und Stella Schmall vom Verlag Springer Spektrum in Heidelberg. Ohne die un-aufhörlichen E-Mail- und Telefonkontakte sowie persönlichen Treffen, ohne deren geduldige Beantwortung aller meiner inhaltlichen und vor allem organisatorischen Fragen sowie ihrem Verständnis für meine Wünsche hätte die Veröffentlichung dieses Buches gar nicht gelingen können. Ganz herzlichen Dank vor allem auch an Matthias Delbrück, der sich als fachwissenschaftlich qualifizierter Lektor in mühevoller Kleinarbeit über mehrere Wochen hinweg in die umfangreichen Texte und mathematischen Abhandlungen hat einlesen müssen, der sie kompetent und engagiert korrigiert hat. Und wie hätte schließlich die Gestaltung dieses Buches ohne die Kompetenz und das große Engagement der Firma le-tex publishing services GmbH, koordiniert von Julian Meyer, gelingen können?

Dank schließlich auch an die Studenten und Schüler, die vielen Zuhörer meiner Vorträge und Freunde, die ich in den letzten Jahrzehnten immer

wieder mit meiner Faszination insbesondere auch für das Thema Turbulenz und Selbstorganisation ein bisschen überfallen habe, deren interessante Fragen mich aber auch immer wieder dazu veranlasst haben, meine persönlichen Standpunkte neu zu überdenken und Inhalte noch tiefer zu durchdringen, um besser verständliche Antworten und anschaulichere Erklärungen geben zu können. Auch ohne die unendliche Geduld und Unterstützung meiner geliebten Frau hätte ich dieses Buch niemals schreiben können. Ich danke dir sehr, Angelika. Ich selbst bin glücklich darüber, dass ich die faszinierenden und besonders komplexen Zusammenhänge zwischen dem Chaos und der Turbulenz sowie den kosmischen Strukturbildungs- und selbstorganisierten Entwicklungsprozessen heute noch ein bisschen tiefer verstanden habe.

Inhaltsverzeichnis

1	Chaos und Turbulenzen im Universum	1
1.1	Chaos und Turbulenz im täglichen Umfeld	2
1.1.1	Turbulenzen im Flugverkehr	2
1.1.2	Über die Notwendigkeiten einer Turbulenzreduzierung	5
1.1.3	Positive Aspekte der Turbulenz	6
1.1.4	Einfluss der Turbulenz auf Wolkenbildung	6
1.2	Chaos- und Turbulenzerscheinungen auf unserem Planeten	9
1.2.1	Turbulente Auswirkungen von Naturkatastrophen	9
1.2.2	Verwirbelungen innerhalb des Golfstroms	9
1.2.3	Atmosphärische Turbulenzen	13
1.2.4	Auswirkungen des turbulenten Weltraumwetters	20
1.3	Chaos- und Turbulenzerscheinungen im Sonnensystem	24
1.3.1	Die Sonne als astrophysikalisches Forschungslabor	24
1.3.2	Solare Magnetfelder, Turbulenzen und Sonneneruptionen	24
1.3.3	Atmosphärische Turbulenzen und die Aufheizung der Sonnenkorona	28
1.3.4	Der Sonnenwind und sein Einfluss auf die Heliosphäre	30
1.4	Stellare Turbulenzen	34
1.4.1	Turbulenzen im interstellaren Medium	35
1.4.2	Turbulente frühe Phasen der Sternentstehung	41
1.4.3	Turbulente Sternentwicklungsprozesse	50
1.5	Galaktische Turbulenzen	70
1.5.1	Turbulenzen in der Umgebung unserer Milchstraße	70

1.5.2	Aktive Galaxien	73
1.5.3	Turbulenzen in kollidierenden Galaxienhaufen	78
	Weiterführende Literatur	80
2	Geordnete und sich selbstorganisiert entwickelnde kosmische Objekte	83
2.1	Kosmische Turbulenzen und Selbstorganisationsprozesse in enger Wechselbeziehung	83
2.2	Kosmologische Entwicklungsszenarien	89
2.2.1	Das kosmologische Urknallparadigma	89
2.2.2	Ideengehalt des Urknalls	95
2.2.3	Frühe kosmologische Entwicklungsepochen nach dem Urknall	97
2.2.4	Möglicher kosmologischer Einfluss primordialer magnetischer Feldstrukturen	109
2.2.5	Pop-III-Sterne, frühe Supernovae und massereiche stellare Schwarze Löcher	113
2.2.6	Entstehung erster Proto- und Zwerggalaxien	119
2.3	Wohlgeordnete galaktische Strukturen	121
2.3.1	Vielfalt der Galaxientypen	121
2.3.2	Galaktische Kollisionsstrukturen	125
2.4	Scheibe-Jet-Strukturen um kompakte Himmelsobjekte	129
2.4.1	Galaktische Scheibe-Wind-Strukturen der Milchstraße	129
2.4.2	Das kosmische Scheibe-Jet-Paradigma	129
2.4.3	Scheibe-Jet-Strukturen aktiver galaktischer Kerne	132
2.4.4	Protostellare Scheibe-Jet-Strukturen	133
2.4.5	Stellare Scheibe-Jet-Strukturen	137
2.5	Selbstorganisationsprozesse im Sonnensystem	143
2.5.1	Geordnete Scheibenstrukturen im Sonnensystem	144
2.5.2	Solare magnetische Selbstorganisationsprozesse	147
2.5.3	Selbstorganisationsprozesse im Erdsystem	149
	Weiterführende Literatur	152
3	Turbulenz- und Chaostheorien	153
3.1	Turbulenz in neutralen Fluiden	161
3.1.1	Erzeugung von Turbulenzen	161
3.1.2	Zur Entwicklung von Turbulenzmodellen	169
3.1.3	Zur Vermessung und statistischen Analyse von Turbulenzfeldern	179
3.2	Deterministisches Chaos	189

3.2.1	Grenzen der Naturerkenntnis	189
3.2.2	Grundlagen der Chaostheorie	193
3.2.3	Ordnungsstrukturen und Deterministisches Chaos in der Populationsdynamik	200
3.2.4	Chaos und Turbulenz: eine enge Verwandtschaftsbeziehung	204
3.3	Turbulenz in magnetisierten Medien	207
3.3.1	Zur Bedeutung der Plasmaturbulenz	207
3.3.2	Magnetohydrodynamische Fluidturbulenzen	219
3.3.3	Datengewinnung im Rahmen der kosmischen Plasmaturbulenz	225
3.3.4	MHD-Turbulenztheorien	228
3.3.5	Zur besonderen Komplexität magnetischer Turbulenzen	234
3.4	Kinetische Plasmaturbulenzen	239
3.4.1	Magnetohydrodynamische und kinetische Turbulenz	239
3.4.2	Kinetische Turbulenzmodelle	242
3.4.3	Kollisions-, Dämpfungs- und Dissipationsprozesse in kosmischen Plasmen	247
3.5	Zur Bedeutung kosmischer Turbulenzforschung	250
3.5.1	Elemente der Turbulenzforschung	250
3.5.2	Grenzen der Turbulenzanalyse und Schließungsprobleme	253
3.5.3	Die Eigenschaften kosmischer Turbulenzen	255
	Weiterführende Literatur	256
4	Theorien zur Selbstorganisation	259
4.1	Kosmische Selbstorganisation	259
4.2	Zur historischen Entwicklung und Verwendung des Begriffs der Selbstorganisation	263
4.2.1	Selbstorganisation – Vom Urknall bis zum menschlichen Geist	268
4.2.2	Synergetik, die Lehre der Selbststrukturierung von Materie und Natur	269
4.2.3	Hyperzyklen und die Entwicklung des Lebens	270
4.2.4	Die Gaia-Hypothese und das Leben auf unserem Planeten	271
4.3	Selbstorganisierte Strukturbildungsprozesse in Fluiden	275
4.3.1	Ausbildung von Taylor-Wirbeln in rotierenden Fluiden	275

4.3.2	Thermisch getriebene Konvektionsströmungen	278
4.3.3	Musterbildungsprozesse bei chemischen Reaktionen	281
4.4	Theorien zur Selbstorganisation	282
4.4.1	Entropie und Selbstorganisationsprozesse in dissipativen Strukturen	282
4.4.2	Synergetik, Ordnungsparameter und das Prinzip der Versklavung	286
4.4.3	Selbstorganisationsprozesse in autokatalytischen Hyperzyklen	293
4.4.4	Selbstorganisierte Kritikalität und Katastrophentheorie	298
4.5	Allgemeine Charakteristika selbstorganisierter Systeme	303
	Weiterführende Literatur	307
5	Astrophysikalische Strukturbildungsprozesse	309
5.1	Magnetische Selbstorganisationsprozesse	316
5.1.1	Dynamoprozesse zur Erzeugung kosmischer Magnetfelder	320
5.1.2	Turbulente kleinskalige Dynamos	321
5.1.3	Dynamotheorie mittlerer Felder	323
5.1.4	Der turbulente magnetische Aktivitätszyklus der Sonne	328
5.1.5	Turbulente Planetare Dynamoprozesse	332
5.1.6	Erzeugung magnetischer Saatfelder	341
5.1.7	Spezielle Organisationsformen magnetischer Felder	346
5.2	Selbstorganisationsprozesse in stellaren und galaktischen Systemen	348
5.2.1	Stellare Entwicklungsprozesse	349
5.2.2	Organisationsformen galaktischer Systeme	356
5.2.3	Selbstorganisationsprozesse in Scheibe-Jet-Systemen	369
5.3	Entstehung der Planetensysteme	380
5.3.1	Historisches zur Planetensystementwicklung	380
5.3.2	Besondere Eigenschaften extrasolarer Planetensysteme	384
5.3.3	Staubbildung und die Entstehung der Planetesimale	387
5.3.4	Das „Grand-Tack-Modell“ und die Entwicklung des inneren Sonnensystems	396
5.3.5	Die Entstehung des Erde-Mond-Systems	405
5.3.6	Das „Nizza-Modell“ und die Entwicklung des äußeren Sonnensystems	407
5.3.7	Die Atmosphären der Planeten	413
	Weiterführende Literatur	419

6	Unser Leben im Universum	421
6.1	Grundlagen für die Evolution des Lebens	421
6.1.1	Über die Möglichkeit von Leben auf Planeten	423
6.1.2	Astrophysikalische und geologischen Grundlagen für die Evolution des Lebens auf der Erde	426
6.1.3	Erdatmosphärische Lebensgrundlagen	429
6.1.4	Über die Zellstrukturen als Basiselemente der Lebensentwicklung	431
6.2	Sonne, Heliosphäre und das Weltraumwetter	433
6.2.1	Der Sonnenwind in der Heliosphäre	434
6.2.2	Einflussnahme auf Prozesse in der Erdmagnetosphäre	436
6.2.3	Auswirkung des Weltraumwetters auf den Menschen	439
6.3	Biochemische Entwicklung des Lebens auf der Erde	442
6.3.1	Zur Definition des Lebensbegriffs	443
6.3.2	Geeignete Orte und notwendige Bedingungen für die frühe Entstehung von Leben	448
6.3.3	Makromoleküle und Zellstrukturen	454
6.3.4	Zellatmung und die Erzeugung des Energieträgers ATP	457
6.3.5	Die Entwicklung der Zellstrukturen	463
6.3.6	Selbstorganisation des Lebens	467
6.4	Stoff-, Energiekreisläufe und das Erdklima	477
6.4.1	Stoffkreisläufe im System Erde	479
6.4.2	Die Energiekreisläufe des Erdsystems	488
6.4.3	Das komplexe Klimasystem der Erde	491
6.5	Wachstumsgrenzen für das Erdsystem	494
6.5.1	Die zunehmende Abstrahlung „thermischen Mülls“	494
6.5.2	Über die Grenzen regenerativer Energien	495
6.5.3	Die Entladung der Erdatterie	498
	Weiterführende Literatur	500
	Epilog	503
	A Mathematische Grundlagen	511
	B Physikalische Grundlagen	529
	Glossar	571
	Sachverzeichnis	587