

Morphologische Erscheinungen in der Meteorologie

Phillip B. Chilson – Christa Chilson

How does one understand the concept of morphology in the field of meteorology? It depends upon whom you ask. The Glossary of Meteorology published by the American Meteorological Society (AMS 2000) simply states: „A study of the structure, form, or shape of meteorological phenomena such as clouds or ice crystals.” Here we explore morphology not only in this context but also in the context of the dynamical evolution that brings about these structures. How one perceives structure is critically dependent upon the spatial and temporal scales of interest. For example, it is possible to describe the structures in clouds over 100's of kilometers as seen from satellites, or the fractal dimensionality of clouds over scales of 100's of meters, or even the distribution of individual cloud particles over scales of 100's of millimeters. The same principle holds for atmospheric dynamics. Large-scale atmospheric motions eventually release their energy to smaller and smaller scales in a cascade effect until all that remains is the thermal motions of molecules in the form of heat. These concepts are discussed while drawing upon several examples taken from actual meteorological phenomena such as fine-scale turbulence, the formation of snowflakes, atmospheric waves, and the atmospheric boundary layer.

Kurzfassung

Wie ist der Begriff der „Morphologie“ im Rahmen der Meteorologie zu verstehen? Nun, da kommt es darauf an, wen man fragt. Das „Glossary of Meteorology“ (herausgegeben von der Amerikanischen Meteorologischen Gesellschaft, AMS 2000) nennt schlicht folgendes: Morphologie ist die Untersuchung des inneren Aufbaus, der Anordnung oder der äußeren Gestalt von meteorologischen Erscheinungen wie beispielsweise Wolken oder Eiskristalle. In diesem Beitrag soll die Morphologie nicht allein in diesem Zusammenhang erkundet werden als vielmehr auch im Hinblick auf die dynamischen Entwicklungsvorgänge, welche zu diesen Erscheinungen führen. Wie man eine Erscheinung wahrnimmt, hängt entscheidend davon ab, welche räumlichen und zeitlichen Ausdehnungen betrachtet werden. So lassen sich beispielsweise Wolken-Formationen, die sich über hunderte von Kilometern erstrecken so beschreiben, wie man sie vom Satelliten aus wahrnimmt, oder die fraktalen Dimensionen in den Wolken über hunderte von Metern oder gar die Verteilung einzelner Wolkenteilchen im 100-

Millimeter-Bereich. Dasselbe gilt im Grunde für die Bewegungen in der Atmosphäre. Die Energie großräumiger, atmosphärischer Bewegungen wird in einer Art Kaskade an nachfolgende Bewegungen von immer kleineren Maßstäben abgegeben, bis schließlich alles in die Bewegungsenergie von Molekülen in Form von Wärme umgewandelt ist. Solche Betrachtungen werden in diesem Beitrag vorgestellt; dazu werden reichlich Beispielfälle beigezogen, die von echten Wetter-Phänomenen stammen, wie die Turbulenz im kleinen Maßstab, die Formation von Schneeflocken, die atmosphärischen Wellen und die atmosphärische Grenzschicht.

1. Einführung

Bevor wir uns dem Thema der Morphologie in der Meteorologie widmen, soll uns zuerst ein kurzer geschichtlicher Rückblick über die Verbundenheit des Menschen mit Wetter und Natur darauf vorbereiten. Schon seit jeher wohnt dem Menschen ein ungemeines Interesse für das Wetter und die damit verbundenen Vorgänge inne. Das ist natürlich keine Überraschung, wenn man bedenkt, wie eng sein Überleben und Wohlbefinden an die natürlichen Gegebenheiten wie Hitze und Kälte, Regen und Dürre sowie stürmisches und ruhiges Wetter gebunden sind. Gewisse sich wiederholende Vorgänge des Wetters sind sicherlich schon sehr frühzeitig erkannt worden, und zwar nicht nur die täglichen Zyklen betreffend, sondern auch jene, die nur nach einem längerem Zeitraum wiederkehren. So folgten den kalten und unfruchtbaren Monaten des Winters die warmen und fruchtbaren Zeiträume des Frühjahrs. In bestimmten Gegenden mit erheblichen jährlichen Niederschlägen folgte die mit Sehnsucht erwartete Regenzeit den Dürreabschnitten. Durch das Beobachten und Wahrnehmen dieser Vorgänge wurde es dem Menschen möglich, sich den Bedingungen des Wetters anzupassen. So erkannte er beispielsweise die Notwendigkeit, in klimatisch mildere Gegenden zu ziehen oder sich im Lande auf das Kommen des Winters vorzubereiten. Wahrscheinlich wurde durch die langjährig gesammelten Beobachtungen auch eine gewisse Erwartung oder Vorfreude auf das Wiederkehren bestimmter natürlicher Vorgänge erweckt, wie zum Beispiel auf das Kommen des Frühlings, einer Regenzeit oder den Segen einer fruchtbaren Ernte. In vielen Kulturen waren diese Ereignisse mit großen Feierlichkeiten verbunden.

Nachdem der Mensch die der Natur innewohnenden Vorgänge lange beobachtet hatte, richtete er nun sein Interesse darauf, die Naturkräfte, welche solche Schauspiele bereiteten, zu verstehen. Er fragte sich nach den Hintergründen der rhythmischen Veränderungen in seiner Umgebung.

Gewöhnlicherweise wurde das Geschehen in der Natur irgendeinem übernatürlichen Wesen zugeschrieben, welches außerdem meist noch als launenhaft oder sogar rachbegierig wahrgenommen wurde. Diese Auffassung war im Einklang mit den unberechenbaren und oft verheerenden Geschehnissen in der Natur. Wurden die Götter nicht bei guter Laune gehalten, dann ließen sie ihren Zorn in der Form von schlechtem Wetter oder Naturkatastrophen an den Menschen aus. Infolgedessen strebten jene frühgeschichtlichen Völker danach, mit den Göttern in Harmonie und Ausgeglichenheit zu leben. So wurden den Göttern Gebete und Opfer dargebracht, um sie zu besänftigen und bei Laune zu halten. Außerdem wurden feierliche Rituale durchgeführt mit dem Ziele, günstiges Wetter herbeizuführen.

Mit der Zeit verstand man, dass viele Vorkommnisse in der Atmosphäre, von denen man vorher annahm, dass sie zufällig wären, durchaus erklärbar waren. So erkannte man die entsprechenden Vorboten für viele verschiedene Wetterverhältnisse. Man könnte eigentlich sagen, dass die Wetterkunde nichts weiter ist, als eine gründliche Untersuchung von erkennbaren, sich wiederholenden Verhaltensmustern und Erscheinungen. Der Bauer wie auch der Seemann, der den Himmel scharf beobachtete, konnte Wetterentwicklungen anhand von Wolkenformationen und Windverhältnissen voraussagen. Die erworbene Weisheit wurde an die nächste Generation weitergegeben und bildete somit die Grundlage für eine umfangreiche Geschichte der Wetterfolklore. Diese Tradition hat eine lange Liste von Wetterweisheiten hervorgebracht. Hier nur einige Beispiele:

- Bei rotem Mond und hellem Sterne sind Gewitter gar nicht ferne.
- Abendrot – Gutwetterbot’ – Morgenrot mit Regen droht.
- Hof um den Mond bedeutet Regen, Hof um die Sonne große Stürme.
- Steigt der Rauch ganz gerade nach oben, bleibt das Wetter lange schön.
- Geht die Sonne feurig auf, folgen Wind und Regen drauf.
- Je weißer die Schäfchen am Himmel geh’n, je länger bleibt das Wetter schön.

Natürlich sind solche Weisheiten nicht immer örtlich übertragbar. Sie entsprechen nicht unbedingt der absoluten Wahrheit, sind aber oft eine gute Annäherung daran und basieren außerdem auf meteorologisch bewiesenen Grundsätzen.

Manchmal wurden jenen Leuten, die die Fähigkeit besaßen, Naturgeschehen richtig zu deuten, große Bedeutung beigelegt. Nehmen wir Ägypten als Beispiel. Die Zivilisation konnte in dieser Gegend wegen des nahrhaften

Bodens auf Grund der alljährlichen Überflutung des Nils gut gedeihen. Dieses Geschehen war von solch großem Stellenwert, dass man es dem Gott Hapi, der für Fruchtbarkeit stand, zuschrieb. Die Priester dieser Zeit erkannten, dass das abendliche Erscheinen des Sterns Sirius mit dem Beginn der Überschwemmung des Nils zusammentraf. Sie waren Priester aufgrund der Bedeutsamkeit ihrer Beobachtungen, aber heute würde man sie als Gestirnforscher beschreiben.

Obwohl die zuvor erwähnten Bauern, Seeleute und Priester in der Lage waren, Verhaltensmuster in der Natur zu erkennen und diese meteorologischen Phänomenen zuzuschreiben, verstanden sie doch nicht unbedingt die dahinterliegenden Mechanismen und waren sich nicht im Klaren darüber, inwieweit wirkliche Verbindungen bestanden. So deuteten sie also die Ursachen und Wirkungen nicht immer richtig. Im Falle der Überschwemmung des Nils war die eigentliche Ursache nicht der Erscheinen des Sirius, sondern der Einbruch der Regenzeit im äthiopischen Hochland. Mit der Zeit hing die Deutung von Verhaltensmustern im Wetter immer weniger vom Zufall ab, und es gelang immer mehr, die zugrundeliegenden Verhältnisse zu verstehen. In diesem Zusammenhang werden wir nun mit der Untersuchung der Morphologie in der Meteorologie beginnen.

2. Qualifizierende Wetter-Verhaltensmuster: Die griechische Sehensweise

Viele Zivilisationen haben erstaunliche Geschichten darüber, wie sie begannen, beobachtete Verhaltensmuster in der Natur zu quantifizieren. Allerdings wollen wir hier nur auf eine einzige solche Zivilisation näher eingehen, nämlich die der Griechen. Es bietet sich an, die Griechen hierfür auszuwählen, zumal sie ja die Grundsteine für die heutigen westlichen Zivilisationen gelegt haben. Die alten Griechen begannen schon im Jahre 800 v. Chr. die Zusammenhänge innerhalb ihrer eigenen Umgebung sehr genau zu überdenken. Man müsste allerdings einschränken, dass ein systematisches Herangehen an diese Sache erst in der Zeit des Aristoteles (384 – 322 v. Chr.) stattfand. Aristoteles ist für viele bedeutende Erkenntnisse berühmt geworden. Für unsere Erörterung hier ist vor allem sein großes Werk, die *Meteorologica*, von entscheidender Bedeutung. In diesem Werk versuchte er, verschiedene atmosphärische Phänomene wie beispielsweise Blitz, Wolken, Wind, Regenbögen und auch Meteore zu quantifizieren. Aristoteles argumentierte, so wie andere Griechen vor ihm, dass jegliche Materie aus folgenden vier Grundelementen bestehe: Feuer, Luft, Wasser und Erde. Eigentlich glaubte man noch an ein fünftes Element, nämlich den Äther, der der Baustoff der himmlischen Materie sei. Den Äther verstand

man als ein Medium, in dem alles vorhanden sein konnte, denn man glaubte nicht daran, dass die Natur aus einem Vakuum bestehen könnte.

Aristoteles glaubte, dass alle meteorologischen Erscheinungen mit den vier Elementen erklärt werden könnten. Sein Verständnis der Meteorologie ging weit über das Wetter hinaus. Es schloss alles ein, was von oben auf die Erde kam oder über der Erde, hing“. Jedes der vier Elemente wurde mit zwei der folgenden vier Eigenschaften in Verbindung gebracht: heiß, kalt, nass und trocken (siehe Abbildung 1 zur Veranschaulichung). Außerdem glaubte man, dass alle Elemente umwandelbar seien, was durch Abläufe der Kondensation und Verdünnung bewirkt werde. Die Umwandlungen würden sich an bestimmte Richtlinien halten. So würde sich also verdünnte Luft in Feuer umwandeln, kondensierte Luft wiederum in Wind, Wolken und Wasser; Wasser könnte sich dann weiter verfestigen und zu Erde werden. Schließlich gebe es eine klare Rangordnung der Elemente, die dazu diene, alles in Bewegung zu halten. Feuer würde über andere Elemente aufsteigen und Erde würde hinuntersinken; Wasser würde über Erde aufsteigen, aber nicht über Luft; die Luft wiederum würde über Wasser aufsteigen, aber nicht über Feuer. Aus diesem Grunde würden sich die Wolken über der Erde bilden und ebenso die Luftblasen im Wasser.

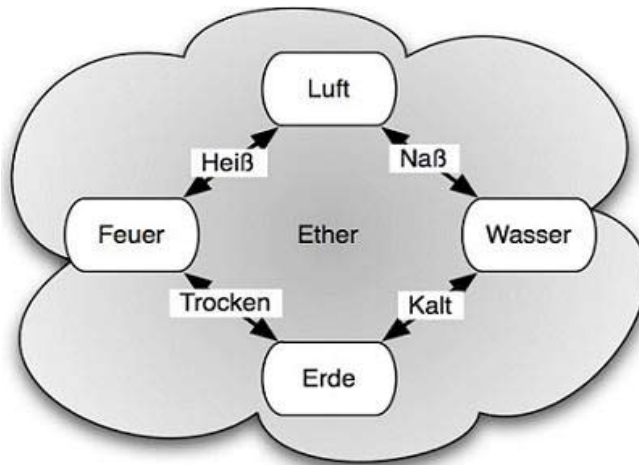


Abbildung 1: Wechselbeziehungen zwischen den Elementen der Materie gemäß Aristoteles

Aristoteles gemäß konnte sich die Luft zu Wasser kondensieren und dann als Regen auf die Erde fallen. Das gleiche galt für den Tau, der allerdings nicht herunterfallen musste. Diese Ansichten erklärten die verschiedenen Phasen von Wasser, aber über das Vorkommen von Hagel im Sommer war Aristoteles etwas verblüfft. Seine Auffassungen waren gewiss sehr erfinderisch und schöpferisch, auch wenn sie letztendlich falsch waren. Diese Anschauungen herrschten noch 2000 Jahre nach seinem Tod vor und behinderten sogar die Entwicklung der atmosphärischen Wissenschaft. Erst durch Galileo Galilei wurden die aristotelischen Ansichten verdrängt und durch ein neues Wissenschaftsverständnis ersetzt.

3. Wetterverhaltensmuster über räumliche und zeitliche Skalen

Um eine vollständige Einsicht über die Rolle der Morphologie innerhalb von Wettersystemen zu erzielen, ist es notwendig, zuerst über die unglaublich weitreichenden räumlichen und zeitlichen Ausmaße nachzudenken. Zum Beispiel muss man für weite räumliche und lange zeitliche Skalen atmosphärische Bewegungen ins Auge fassen, deren Längen mit dem Durchmesser der Erde vergleichbar sind und deren Zeiten in der Größenordnung von Tagen stehen. Zu den wesentlichen Einflüssen in diesem Bereich gehören die Erdumdrehung, die ungleichmäßige Erhitzung der Erde und die Verteilung von Landmassen und großen orographischen Erscheinungen. Im anderen Extrem, wenn man sich mit Vorgängen im Millimeterbereich und mit Laufzeiten im Sekundenbereich beschäftigt, wird es nötig, die molekularen Wechselbeziehungen der einzelnen atmosphärischen Teilchen mit in Erwägung zu ziehen. Es gibt nicht nur eine Vielzahl von atmosphärischen Prozessen, sondern es muss auch beachtet werden, dass diese sich gegenseitig beeinflussen.

Anfangs hat es den Anschein, dass es fast unmöglich sei, die Atmosphäre in solch einem Ausmaß zu erörtern. Um Fortschritte im Verstehen der Atmosphäre und der dazugehörigen Morphologie zu machen, ist es entscheidend, den Fragebereich in kleinere, überschaubare Untereinheiten zu zerlegen. Dann besteht die endgültige Herausforderung darin, die relative Bedeutung der einzelnen Faktoren, die diese Untereinheiten beeinflussen, richtig einzuschätzen. Wenn man beispielsweise versucht, die Stärke und Lage des Jetstreams in Europa während der nächsten 24 Stunden vorherzusagen, könnte man auch den Einfluss der Getreidefelder in Bayern auf den niedrigen Wind mit einbeziehen, aber dies wäre nur

ein minimale Beeinflussung. Allerdings bietet es sich schon an, die Oberflächenerwärmung der gleichen Getreidefelder zu beachten, wenn man die allgemeinen Strukturen von konvektiven Wolken, wie sie sich im Sommer bilden, erörtert.

Beim Unterteilen der Atmosphäre in Untereinheiten fanden es die Meteorologen zweckmäßig, mehrere allgemeine räumliche Skalen zu definieren. Diese sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die vier Hauptgruppierungen sind die planetarische Skala, die synoptische Skala, die Mesoskala und die Mikroskala, aber wie man schon aus der Tabelle ersehen kann, können auch diese wiederum in weitere Untereinheiten zerlegt werden. Um ein besseres Gefühl für die räumlichen und zeitlichen Skalen zu bekommen und einige der damit verbundenen atmosphärischen Erscheinungen zu erklären, haben wir Abbildung 2 eingefügt. Diese Abbildung wurde von Dr. Czeckowsky am Max-Planck-Institut für Aeronomie (heute Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung) bereitgestellt. Wie wir daraus ersehen können, haben kleine räumliche Erscheinungen entsprechende kurze zeitliche Skalen und umgekehrt. Es wäre nicht sinnvoll, allgemeine Gleichungen zu erstellen, die man über den ganzen Bereich dieser Skalen verwenden würde. Im Grunde formen jene verschiedenen Arbeitsgebiete die fundamentalen Bausteine der atmosphärischen Analyse und die Grundlage für die Morphologie in der Meteorologie.

Größer als	Skala	Name
20,000 km		Planetarische Skala
2,000 km		Synoptische Skala
200 km	Meso- α	Mesoskala
20 km	Meso- β	Mesoskala
2 km	Meso- γ	Mesoskala
200 m	Mikro- α	Turbulenz in der Grenzschicht
20 m	Mikro- β	Turbulenz in der Bodenschicht
2 m	Mikro- γ	Turbulenz im Trägheitsbereich
2 mm	Mikro- δ	Kleinskalige Turbulenz
Luftmoleküle	Molekular	Viskoser Dissipations-Teilbereich

Tabelle 1: Die räumlichen Größenordnungen bzw. Skalenbereiche zum Beschreiben atmosphärischer Phänomene

Im Folgenden zeigen wir zwei Beispiele, in denen ein bestimmtes atmosphärisches Phänomen in der passenden Größenordnung analysiert wird. Erwägen wir zuerst die Entstehung und Ausbreitung eines Systems von Gewittern. Gewitter können erzeugt werden, wenn warme, feuchte Luft durch irgendeinen Vorgang nach oben geführt wird. Dieser Vorgang könnte Oberflächenerwärmung oder die Einfuhr eines kalten, dichten Luftstroms sein. Wenn die Bedingungen richtig sind, dann werden diese aufströmenden Luftmassen durch Auftriebskräfte weiter nach oben gezogen. Des Weiteren kühlen sich die Luftmassen beim Aufsteigen wesentlich ab, was zur Kondensation des verfügbaren Wasserdampfes führt. Die Abgabe von Wärme bei diesem Vorgang erwärmt die Luft noch weiter und fördert die Aufwärtsbewegung der Luftmassen. Das Ergebnis ist ein starker Aufwind und eine rasche Kondensierung des Wasserdampfes, was wiederum zur Präzipitation und zur Trennung elektrischer Ladungen führt. An der Erdoberfläche entsteht durch den Niederschlag ein Gebiet kalter Luftmassen, welches aus dem Gewitter herausströmt. Wenn die vorherrschenden Bedingungen richtig sind, dann kann dieser kalte Luftschub weitere Gewitter hervorrufen. Alle soeben beschriebenen dynamischen und thermodynamischen Vorgänge spielen sich innerhalb des Mesoskalenbereichs ab. Wenn es jedoch notwendig wird, die gesamten meteorologischen Bedingungen, die für ein Gewitter bedeutsam sind, zu erwägen, dann müssen wir auch auf Erscheinungen im synoptischen Skalenbereich zurückgreifen. Die zugrundeliegende atmosphärische Physik ist in beiden Fällen die gleiche, aber die analytischen Werkzeuge sind dem jeweiligen Skalenbereich angepasst. Als zweites Beispiel betrachten wir die Städte-Meteorologie. Man muss vielleicht vorhersehen können, wie ein Windfeld auf Gebäude oder Straßenschluchten einwirkt, aber es ist nicht einfach, solche Wechselbeziehungen im Kleinskalenbereich zu ermessen. Allerdings können die gesamten, im Mesoskalenbereich vorhergesagten Windfelder als Eingabe-Parameter für den erwünschten Mikroskalenbereich verwendet werden. Es können sozusagen Vorgänge, die in verschiedenen Skalenbereichen ablaufen, synergistisch über ihre eigenen Grenzen hinaus miteinander verbunden werden.

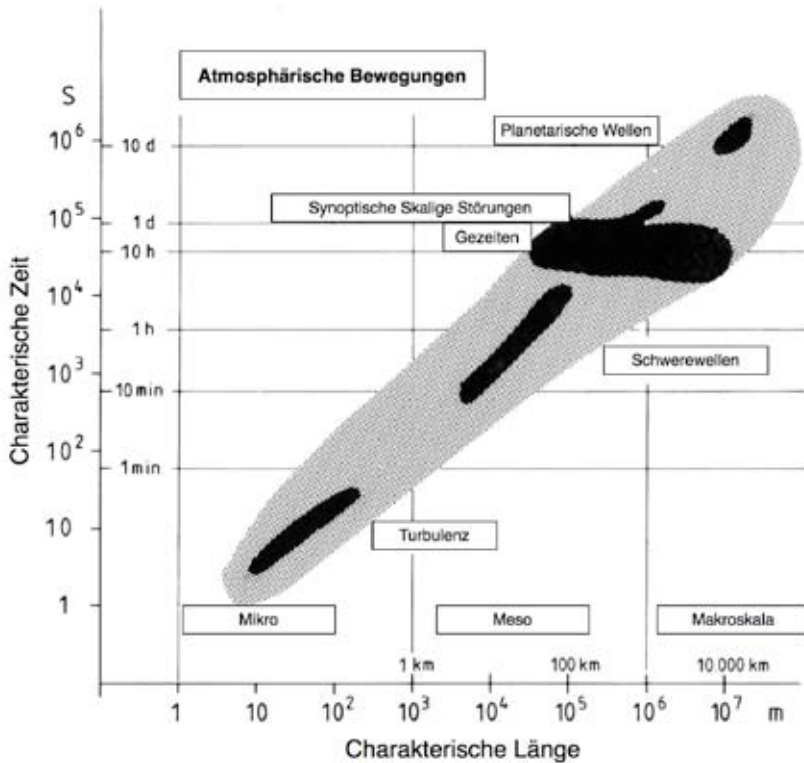


Abbildung 2: Darstellung von gewöhnlichen Phänomenen in der Atmosphäre innerhalb üblicher zeitlicher und räumlicher Skalen

Als ein Beispiel, wie eine Kopplung sich über Skalen hinaus in der Atmosphäre offenbart, betrachten wir nun die Wechselbeziehungen zwischen dynamischen Vorgängen, wie sie innerhalb der planetarischen Grenzschicht üblich sind. Wenn wir von der Grenzschicht sprechen, meinen wir jenen Teil der Atmosphäre, welcher in starker Beziehung zur Erdoberfläche steht und von Reibung und Wärmeeinwirkungen beeinflusst wird. Üblicherweise ist die Dicke der Grenzschicht über Land ungefähr 100-200 m während des Abends und ungefähr 1-2 km während des Tages. Diese Werte hängen letztendlich von den allgemeinen atmosphärischen Bedingungen und den Oberflächen-Gegebenheiten ab. Natürlich ist die Grenzschicht ein höchst bedeutender Bereich der Atmosphäre, wenn man bedenkt, dass sie unser Lebensraum ist.

Besonders während des Tages sind atmosphärische Luftbewegungen innerhalb der Grenzschicht stark von der Turbulenz beeinflusst. Die Turbulenz umfasst die chaotischen, stochastischen Bewegungen in Flüssigkeiten und steht mit einer schnellen Änderung von Druck, Temperatur und Geschwindigkeit in Verbindung. Die Geschwindigkeit der Flüssigkeit ist zu einem beliebigen Zeitpunkt beständig unregelmäßigen Schwankungen ausgesetzt. Aus diesem Grunde wird die Atmosphäre in der Meteorologie als eine Flüssigkeit betrachtet. Wenn wir die atmosphärische Turbulenz sehen könnten, dann würden wir eine Ansammlung von Wirbeln sehen, die innerhalb eines räumlichen und zeitlichen Skalenbereichs angesiedelt sind. Es wäre offensichtlich, dass diese Wirbel nebeneinander bestehen und beständig aufeinander einwirken. Eine Darstellung dieser Wechselwirkungen von Wirbeln ist in Abbildung 3 zu sehen.

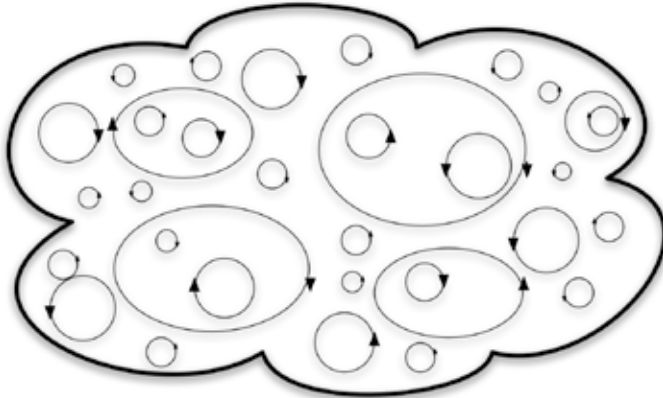


Abbildung 3: Veranschaulichung atmosphärischer Turbulenz

Stochastische Systeme, wie sie in Turbulenzen vorkommen, sind von Natur aus nicht deterministisch, aber es können trotzdem sinnvolle Parameter errechnet werden. Da es unmöglich ist, die Bewegungsabläufe von einzelnen Teilchen in einer Flüssigkeit zu berechnen, haben sich Wissenschaftler zu einer statistischen Vorgehensweise entschlossen. Nehmen wir an, wir haben eine bestimmte Menge von Gas in einem festen Behälter von gleichbleibendem Volumen eingeschlossen. Man hat herausgefunden, dass hier die Wärmeenergie der gesamten Gasteilchen in einer Beziehung zur Temperatur des Gases steht. Deshalb kann man zusammenfassend sagen, dass die zufälligen Zusammenstöße der Teilchen mit der Wand des Behälters statistisch als Druck quantifiziert werden können. Tatsächlich ist in diesem Beispiel der Druck einzig von der Temperatur abhängig. Die unmögliche

Aufgabe, die Lage und die Geschwindigkeit der Gasteilchen zu verfolgen, ist somit auf eine ganz einfache Gleichung zurückgeführt worden, nämlich $P = \rho R T$, wobei P der Druck ist, ρ die Dichte des Gases und R eine Konstante, die sich auf das jeweilige Gas bezieht. Wenn man sich diese täuschend einfache Gleichung ein bisschen genauer ansieht, dann lässt sich daraus eine reichhaltige Vielfalt statistischer Physik erschließen.

Die Auswirkungen der Turbulenz und stochastischer Vorgänge findet man überall in der Natur, und sie waren und sind noch immer das Thema langer Reihen von Erkundungen. Allerdings ist die Turbulenz trotz dieser Bemühungen eines der am wenigsten verstandenen Gebiete in der klassischen Physik geblieben. Warum ist das so? Schon 1755 gelang es dem Schweizer Mathematiker Euler, ein System von Gleichungen aufzustellen, das die Bewegungen von Flüssigkeiten beschrieb. Er hatte jedoch die Auswirkungen der Viskosität, welche ein Maßstab für den Widerstand einer Flüssigkeit ist, nicht miteinbezogen. Das mathematische Bezugssystem, das heute häufig gebraucht wird, um zähflüssige und wärmeleitende Flüssigkeiten zu beschreiben, nennt man die Navier-Stokes-Gleichungen; sie wurden zwischen 1822 und 1845 von dem Franzosen Navier und dem Briten Stokes formuliert. Diese Gleichungen sind das Herz und die Seele aller hydrodynamischen Modelle, mit denen man newtonsche Fluide, wie Wasser, Luft oder Öl beschreibt; jedoch werden auch sie der Verflochtenheit der Turbulenz nicht gerecht. Ein halbes Jahrhundert nach dem Werk von Navier und Stokes wurden Wissenschaftler wegen des Mangels an neuen Erfolgen in ihrem Verständnis der Turbulenz wieder entmutigt. Während einer Ansprache vor der britischen Gemeinschaft für wissenschaftlichen Fortschritt (British Association for the Advancement of Science) im Jahre 1932, soll der bekannte und geschätzte britische Physiker Horace Lamb folgendes gesagt haben: „I am an old man now, and when I die and go to Heaven there are two matters on which I hope for enlightenment. One is quantum electrodynamics, and the other is the turbulent motion of fluids. And about the former I am really rather optimistic.“ (Heute bin ich ein alter Mann und wenn ich einst sterbe und in den Himmel komme, möchte ich dort gerne zwei Fragen beantwortet haben, die eine über die Quanten-Elektrodynamik und die andere über die Turbulenz von Flüssigkeiten. Hinsichtlich der ersten Frage bin ich noch recht optimistisch.)

Ein gewisser Erfolg kam endlich, als der russische Wissenschaftler Komogrov im Jahre 1950 in der Lage war, die Turbulenz teilweise zu charakterisieren. Komogrov zufolge kommt der größte Teil der kinetischen Energie in einem Fluid (wir meinen hier die Atmosphäre) in größeren

Skalen vor. Diese Energie wird dann an kleinere und noch kleinere Skalen weitergegeben. Die kinetische Energie wird also von den größeren Wirbeln an kleinere Wirbel abgegeben, und zwar durch eine Reihe von Vorgängen, die man als Energiekaskade bezeichnet. Die Energie wird beständig an kleinere Skalen abgegeben, bis die turbulenten Wirbel so klein sind, dass molekulare, diffusive Kräfte eine wichtige Rolle spielen und die Energie in Form von Wärme abgegeben wird. Eine graphische Darstellung des Kaskadenvorgangs ist in Abbildung 4 zu sehen. Die y-Achse des Diagramms bezeichnet den Betrag der kinetischen Energie pro Wirbel für eine bestimmte Größe. Die Wellennummer befindet sich auf der x-Achse. Für unsere gegenwärtige Erörterung kann man sich die Wellennummer k als die inverse charakteristische Größe der turbulenten Wellen denken, und zwar innerhalb der Grenzschicht. Dies ist ähnlich wie die Beziehung zwischen Zeit und Frequenz. Eine Erhöhung der Wellenzahl entspricht also einer Abnahme der Größe. Den Bereich der Wellenzahlen (Größen), für welche der Kaskadenvorgang stattfindet, nennt man Trägheitsbereich (inertial subrange), und dieser ist sehr wichtig für die atmosphärische Dynamik. In der atmosphärischen Grenzschicht werden kinetische Energien in der Größenordnung von 100-200 m angeregt, und eine Erwärmung tritt ungefähr dann auf, wenn die Wirbel 1 mm groß sind. Die Energiekaskade beschreibt die Umwandlung von turbulenter, kinetischer Energie innerhalb räumlicher Skalen, die sich um fünf Größenordnungen bzw. Zehnerpotenzen voneinander unterscheiden!

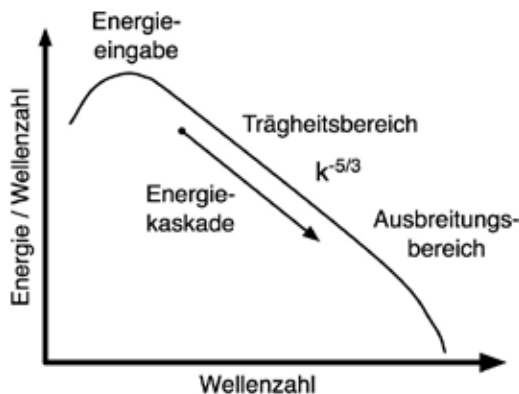


Abbildung 4: Darstellung des Energiegehalts turbulenter Strömungen als eine Funktion der Wellenzahl

4. Frühzeitige Wettervorhersage-Modelle

Im Jahre 1904 wies der Norweger Bjerknæs darauf hin, dass es möglich sein sollte, quantitative und objektive Wettervorhersagen zu machen, die auf der deterministischen Theorie der atmosphärischen Bewegung und den Navier-Stokes Gleichungen basieren. Er behauptete also, dass es möglich sei, das Wetter anhand analytischer Modelle vorherzusagen. Diese Vorgehensweise gleicht also nicht den Vorhersagen von erfahrenen Leuten, die sich auf Wetterkarten, beobachtete Daten und den Himmel verließen. Die Aussicht auf eine Erstellung von objektiven Wettervorhersagen führte den Begriff der Morphologie in ein neues Zeitalter. Nun wurde es zum ersten Male sinnvoll, nach den zugrunde liegenden Beziehungen zwischen den Verhaltensmustern, die man jahrhundertlang beobachtet hatte, zu suchen. Es ist allerdings fraglich, ob Bjerknæs eine starke Hoffnung auf das Zustandekommen solcher Vorhersagen hatte. Weitere 30 Jahre mussten vergehen, bis Konrad Zuse den ersten binären Rechner in Deutschland entwickelte. Das erste Gerät wurde noch mechanisch betrieben und erst einige Jahre später wurde daraus der erste elektronische Rechner bzw. Computer.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts begann Lewis Fry Richardson mit einem Plan für objektive Wettervorhersagen, welche auf den Ergebnissen von Bjerknæs beruhten, und zwar ohne mechanischen oder elektronischen Rechner. Er veröffentlichte diese wegweisenden Vorstellungen im Jahre 1922. Weil es zu der Zeit noch keine physikalischen Rechner gab, stellte sich Richardson menschliche Rechner vor. Nach seinen Berechnungen bräuchte man 64.000 Menschen, die rund um die Uhr arbeiteten, um angemessene Wettervorhersagen zu erstellen. Er stellte sich vor, dass diese Personen zusammen in einer großen Halle arbeiten würden, wobei jeder einzelne eine relativ kleine Aufgabe der Gesamtarbeit übernehme. Läufer würden dann die Ergebnisse zwischen den menschlichen Rechnern übermitteln. Ein Hauptleiter würde die einzelnen Vorgänge überwachen und die Arbeitsabläufe aufeinander abstimmen. Richardson schrieb in dem Buch *Weather Prediction by Numerical Processes* folgendes (Richardson 2007): „Imagine a large hall like a theater except that the circles and galleries go right round through the space usually occupied by the stage. The walls of this chamber are painted to form a map of the globe. ... From the floor of the pit a tall pillar rises to half the height of the hall. It carries a large pulpit on its top. In this sits the man in charge of the whole theatre.“ (Stellen wir uns eine große Halle vor, etwa so wie ein Theater, aber die Kreise und Emporen gehen ganz herum, auch da wo normalerweise der

Schauplatz ist. Die Wände sind so bemalt wie unsere Weltkugel... Vom Boden des Parketts erstreckt sich eine hohe Säule bis zur halben Höhe der Halle. Auf der ist obendrauf eine große Kanzel. Hier sitzt der Mann, der das ganze Theater leitet.) Richardson war sich wohl bewusst, dass es zu seiner Zeit fast unmöglich gewesen wäre, dieses Vorhaben durchzuführen. Im Vorwort zu seinem Buch schrieb er (Richardson 1922): „Perhaps some day in the dim future it will be possible to advance the computations faster than the weather advances and at a cost less than the saving to mankind due to the information gained. But that is a dream.” (Vielleicht wird es eines Tages in ferner Zukunft möglich sein, die Berechnungen schneller zu beschleunigen als die Fortschritte der Wetterforschung und um einen Preis, der geringer ist als die Gewinne, die die neuen Erkenntnisse für die Menschheit erbringen. Aber das ist ein Traum). Vielleicht war es nur ein Traum, aber einer, den er ernsthaft in Betracht zog. In seinem Buch legte Richardson systematisch die Grundlage für ein neues Gebiet der Wetterforschung, nämlich die numerische Wettervorhersage, die auch noch heute betrieben wird. Lewis Fry Richardson wird von vielen sogar als der Urheber dieses Forschungsgebietes angesehen.

Mit der Entwicklung des ENIAC (Elektrischer und Numerischer Integrator und Rechner) im Jahre 1946 durch eine Gruppe von amerikanischen Ingenieuren der Elektrotechnik, geleitet von Mauchly und Eckert, konnte Richardsons Traum endlich Wurzel fassen und beginnen, Wirklichkeit zu werden. Mit der Ablösung mechanischer Relais und Schalter durch die Vakuumröhre wurde der ENIAC tausendmal schneller als die zeitgenössischen Rechner. Der ENIAC wurde vom Militär für die Aufgabe entwickelt, aufwendige, ballistische Flugbahnen auszurechnen. John von Neumann, ein Mathematiker an der Universität Princeton, erkannte sofort, dass der ENIAC auch für die Modellierung von Wettervorhersagen gut geeignet sein würde. Er nahm die Hilfe des amerikanischen Meteorologen Jule Charney in Anspruch, und die beiden lieferten im Jahre 1950 die erste numerische Wettervorhersage mittels des ENIAC. Es dauerte noch ein Jahrzehnt, bis die numerischen Modelle für die Wettervorhersagen besser wurden und in der Lage waren, Vorhersagen zu liefern, die sich mit den subjektiven Analysen menschlicher Meteorologen messen konnten.

Heutzutage sind Computermodelle eine Hauptquelle für die Meteorologie und die Wettervorhersage. Es gibt allerdings noch kein Modell, das alle phänomenologischen und morphologischen Skalen der Atmosphäre behandeln würde. Deshalb ist der Grundsatz, die Umgebung in überschaubare Skalen (wie in Tabelle 1 aufgeführt) zu unterteilen, bestehen geblieben. In

der räumlichen Skala von ungefähr 1 mm bis zu hunderten von Metern kann man turbulente Strömungsmuster mit einem großen Genauigkeitsgrad mittels direkter numerischer Simulation (DNS) ausrechnen. Für größere Skalen verwendet man die Groß-Wirbel-Simulation (LES = large eddy simulation). Mit dieser Herangehensweise werden alle Vorgänge von kleineren Skalen von mehreren 10 Metern mit Parametern versehen (nicht direkt berechnet) und dafür verwendet, flüssige Strömungen innerhalb einer Skala von mehreren 10 Kilometern zu untersuchen. Zusätzlich zur DNS und LES gibt es auch noch mesoskalige Modelle, synoptische Modelle, erdumfassende Umlauf-Modelle usw. Wenn der Bereich, in dem ein Modell verwendet wird, an Größe zunimmt, dann nimmt auch die Größe der kleinsten Einheit des Modells zu. Deshalb wird es immer wichtiger, das gewonnene Wissen über die kleinen Skalen (von Simulationen) zu nützen, um Parameter-Systeme für die Verwendung in Modellen größerer Skalen zu entwickeln.

5. Die Geburt des Chaos

In den späten fünfziger und frühen sechziger Jahren, gerade als die elektronische Computertechnologie sich eingebürgert hatte und die Zukunft von numerischen Wettervorhersagen rosig aussah, kam es in den Hallen des Massachusetts Institute of Technology (MIT) zu einer unerwarteten Wendung. Ein Meteorologe mit dem Namen Ed Lorenz entwickelte seine eigenen Modelle für die Wettervorhersage an einem geräuschvollen Computer in seiner Amtsstube. Weil Lorenz nur eine beschränkte Auswahl von Hilfsmitteln zur Verfügung hatte, hielt er sein Modell sehr schlicht. Seine simulierte Atmosphäre enthielt nur 12 Gleichungen, und die Variablen (Regelgrößen), die errechnet werden konnten, waren lediglich einzelne Größen wie Druck, Temperatur und Windvektoren. Mit jeder Wiederholung in simulierter Zeit erstellte der Computer eine große Menge von Zahlen, die Werte der errechneten Parameter anzeigten. Lorenz' Wettersimulationen gaben Aufschluss über gewisse Beziehungen von atmosphärischen Erscheinungen, und seine Ergebnisse gaben ihm die nötigen Einsichten, um Verhaltensmuster im Wetter zu suchen.

Eines Tages, während seine Simulationen liefen, machte Lorenz eine Entdeckung, die später zu einem völlig neuen Zweig der Mathematik führen sollte. An jenem Tage versuchte er eine Simulation zu wiederholen,

die er schon vorher durchgeführt hatte. Jedoch wollte er das Modell mit der neuen Simulation über einen längeren Zeitraum laufen lassen. Um den Vorgang zu beschleunigen, entschied sich Lorenz für eine Abkürzung. Er initialisierte die neue, halbwegs fertig gelaufene Simulation dadurch, dass er die ausgedruckten Parameter, die also schon erstellt waren, eingab. Er tippte die Zahlen in sein Programm, schaltete den Computer ein und verließ seine Amtsstube, um sich eine Tasse Kaffee zu holen. Als er eine Stunde später zurückkam, bemerkte er etwas Überraschendes. Die Ergebnisse der neuen Simulation waren völlig anders als was er zuvor errechnet hatte.

Nachdem er sicherstellte hatte, dass kein Fehler vorlag, kam Lorenz zur Schlussfolgerung, dass der Unterschied der Ergebnisse ein Rundungsfehler sein müsste, der durch das Eintippen der Parameter in der Mitte der Simulation entstanden war. So wurde zum Beispiel ein Wert von 0.5783214 als 0.578 ausgedruckt. Konnte denn ein Rundungsfehler in den Tausender Dezimalstellen zu solch tiefgreifenden Abweichungen in den simulierten Ergebnissen führen? Dieser Rundungsfehler war doch kleiner als die Fehler in den zahlreichen meteorologischen Beobachtungen, die für das Wettervorhersage-Modell benutzt wurden. Es blieb jedoch unübersehbar, dass die Ergebnisse der beiden Simulationen enorme Abweichungen zeigten. Welche Folgen würde dies für die Zukunft der numerischen Wettervorhersagen haben?

Als geschickter Mathematiker verstand Lorenz, dass diese neue Art der Unvorhersehbarkeit irgendwo in den Zahlen verborgen lag. Man nennt diese Erscheinung die „Empfindlichkeit gegenüber den Anfangsbedingungen“ (sensitive dependance on initial conditions). Das bedeutet, dass kleinste Abweichungen in den Anfangsbedingungen das langfristige Verhalten eines Verfahrens wesentlich verändern können. Heute nennt man das den Schmetterlingseffekt, da man sich vorstellen kann, dass das Schwingen eines Flügels eines Schmetterlings grundsätzlich einen tiefgreifenden Einfluss auf das Wetter nehmen kann, das zu späterer Zeit beobachtet wird. Hieraus entwickelte sich später die Chaosforschung.

Um diese Auswirkung besser zu verstehen, versuchte Lorenz, seine Vorhersage-Modelle so weit wie möglich zu vereinfachen, ohne jedoch die empfindsamen Abhängigkeiten der Anfangsbedingungen zu

vernachlässigen. Es gelang ihm, die Gleichungen, die die Konvektion bestimmen, auf drei zu beschränken; diese wurden dazu benutzt, um Werte von drei verschiedenen physikalischen Parametern vorherzusagen. Das erweckt den Anschein, dass die endgültigen Gleichungen allzu simpel seien, aber die Verhaltensmuster, die diese vorhersagen, sind keineswegs einfach zu verstehen. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel. Die drei vorhergesagten Parameter sind als x , y und z gekennzeichnet und in einem dreidimensionalen Raum eingetragen. Die Lage des Punktes, der von x , y und z bestimmt ist, bewegt sich in unvorhersehbarer Weise zwischen den Iterationen. Allerdings wird die Gesamtheit aller Punkte vom Raum begrenzt, und daraus bildet sich ein gewisses Verhaltensmuster. Solch ein Verhalten veranschaulicht ein deterministisches Chaos und wird ein seltsamer Attraktor genannt. Das besondere Beispiel in Abbildung 5 zeigt den sogenannten Lorenz-Attraktor.

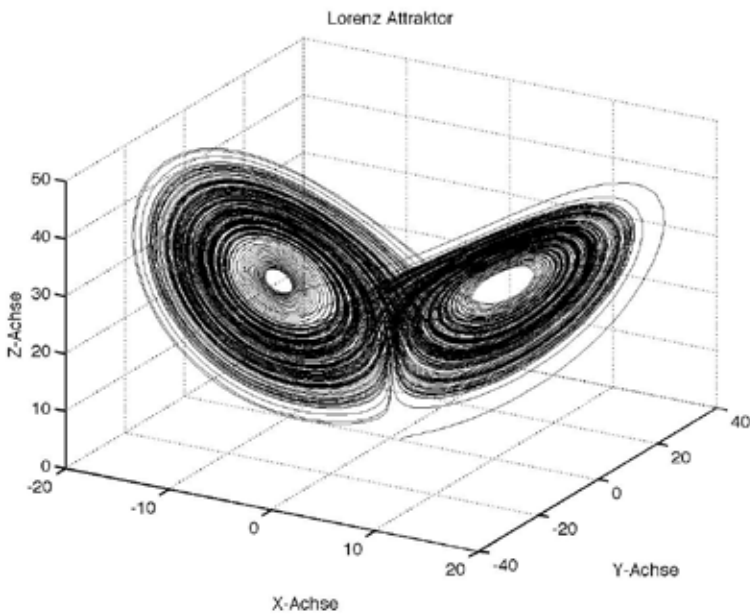


Abbildung 5: Der Lorenz Attraktor veranschaulicht die verschiedenen Muster, die bei chaotischem Verhalten vorkommen

Wie wir wissen, hat die Entdeckung chaotischer Systeme in der Atmosphäre numerische Wettervorhersagen nicht abgelöst. Wissenschaftler wussten schon Hunderte von Jahren vor der Lorenz'schen Chaostheorie von den zufälligen Bewegungen der Turbulenz. Allerdings hat diese Entdeckung, die Hoffnung der Meteorologen auf genaue, langfristige Vorhersagen, auch größere Skalen betreffend, etwas gedämpft. Dennoch können wir darauf zählen, dass die heutigen Grenzen der Vorhersagen für Wetterentwicklungen in der Zukunft weiter hinausgeschoben werden können. Durch eine Verbesserung der Rechenleistungen fortschrittlicher Computer, durch eine feinere Einstellung der Modelle und durch die Entwicklung atmosphärischer Geräte, die genauere Messungen zulassen, wird dies möglich sein. Man muss sich natürlich bewusst sein, dass verstrickte, chaotische Geschehen immer die Oberhand haben werden.

6. Selbst-Ähnlichkeit in der Atmosphäre

Eine weitere fesselnde Erscheinungsform von Chaos in der Natur und in der Atmosphäre ist die sogenannte Selbstähnlichkeit. Einen Gegenstand oder eine Gestalt nennt man selbst-ähnlich, wenn er/sie ähnlich (oder, bei mathematisch erzeugten Gegenständen, gleich) erscheint, unabhängig davon, in welcher Größenordnung er/sie betrachtet wird. Ein Beispiel dafür sind die Fensterbilder, die das Eis an kalten Wintertagen hinterlässt. Die Muster erscheinen ähnlich (wenn auch nicht deckungsgleich), wenn man sie mit einem Vergrößerungsglas oder auch mit dem bloßen Auge ansieht.

Selbstähnliche Gegenstände besitzen in rein rechnerischem Sinne viele fesselnde Eigenschaften. Wir sprachen soeben von der Skalen-Invarianz. In manchen Fällen kann man kaum sagen, wo der Berührungsbereich eines Gebildes beginnt und wo er endet. Vielleicht ist eine der sonderbarsten Eigenschaften solcher Gestalten ihre fraktionale Dimensionalität (weiter unten erklärt). Wegen dieser Eigenschaft nennt man selbst-ähnliche Gebilde oft Fraktale. Man kann sich darüber streiten, ob die Selbst-Ähnlichkeit der Kern der Morphologie in der Meteorologie ist.

Zugleich muss zwischen rein rechnerischen Selbst-Ähnlichkeiten und der Annäherung von Selbst-Ähnlichkeit in der Natur unterschieden werden. Offenkundig ist der Begriff der Skalen-Invarianz in der Natur räumlich beschränkt. Turbulente Strömungen, können zum Beispiel als selbst-ähnlich beschrieben werden, wenn man nur die Skalen innerhalb des Trägheitsbereichs betrachtet. In diesem Fall kann man nicht zwischen großen und kleinen Wirbeln unterscheiden, ohne eine Art von Bezugs-

Skala heranzuziehen. Weitere klassische Beispiele für die Selbst-Ähnlichkeit beziehen sich auf Wolkenstrukturen, Gebilde von Schneeflocken, Wechselbeziehungen zwischen der Grenzschicht und der freien Atmosphäre (Entrainment) usw. In vielen dieser Fälle können durch rein rechnerische Modelle Annäherungen an diese Erscheinungen gefunden werden.

Wir wollen die Selbst-Ähnlichkeit am Beispiel von Schneeflocken, die als Fraktale betrachtet werden können, veranschaulichen. Wir beginnen dies damit, indem wir ein einziges Streckenstück, wie es in der oberen linken Ecke von Abbildung 6 zu sehen ist, betrachten. Das mittlere Drittel dieser Strecke wird durch zwei Streckenabschnitte (die beide ebenfalls ein Drittel der Gesamtlänge einnehmen) in abgewinkelter Weise, entsprechend einem gleichseitigen Dreieck, ersetzt. Aus einer Strecke sind also vier geworden, und so haben wir vier deckungsgleiche Abbildungen. Die Größe dieser neuen Strecken ist zur ursprünglichen um den Faktor drei verschieden. Man sagt, der Vergrößerungsfaktor ist drei. Wenn dieser Vorgang wiederholt wird, dann werden die daraus entstehenden Gegenstände zunehmend unüberschaubar (siehe Abbildung 6). Es ist offensichtlich, dass man, wenn man einen beliebigen Teil der ganzen Gestalt vergrößern würde, wieder ähnliche Formen (in diesem Fall sogar deckungsgleiche) vorfinden würde, und zwar ungeachtet der jeweiligen Vergrößerung. Außerdem wird diese Strecke unendlich lang und bleibt nur vom Raum begrenzt. Dies ist die sogenannte Koch-Kurve (nach dem schwedischen Mathematiker Koch benannt), und sie gehört zur Familie der Fraktale. Wie gesagt kann man solche Muster an vereisten Fenstern finden. Mit dem gleichen Vorgang können wir eine vernünftige Darstellung einer Schneeflocke hervorbringen. Diesmal benutzen wir aber ein Dreieck anstelle einer Strecke als Ausgangspunkt. Nach nur drei Wiederholungen werden die entstehenden Muster den echten Schneeflocken, wie sie in Wolken beobachtet werden, bereits ähnlich. Dies ist allerdings nur ein Beispiel für Veranschaulichungs-Zwecke. Mittels Fraktalen können weitaus echter aussehende Schneeflocken gebildet werden.

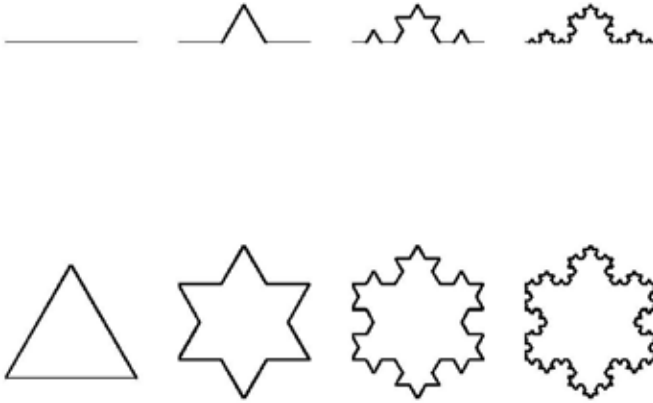


Abbildung 6: Entstehung der Koch-Kurve und der Koch'schen Schneeflocke

Was bedeutet es zu sagen, dass selbst-ähnliche Gegenstände eine fraktale Dimension haben? Nun, wir wissen schon, dass ein Punkt nulldimensional ist, eine Strecke eindimensional, eine Ebene zweidimensional und ein Würfel dreidimensional, aber was bedeutet der Begriff der Dimensionalität wirklich? Einfachheit halber arbeiten wir in den nachfolgenden Beispielen mit dem Vergrößerungsfaktor zwei. Das bedeutet, eine selbst-ähnliche Abbildung der nächsten Größe ist um den Faktor zwei verschieden. Nehmen wir zwei gleiche Streckenstücke der Länge eins. Aneinandergefügt bilden diese ein selbst-ähnliches Streckenstück der Länge zwei. Mit dem Vergrößerungsfaktor zwei betrachtet finden wir also zwei selbst-ähnliche Streckenstücke vor. Genauso können wir ein Quadrat aus vier gleichgroßen Quadraten bilden. Wenn wir das größere Quadrat mit dem Vergrößerungsfaktor zwei betrachten, dann sehen wir vier selbst-ähnliche Abbildungen (2×2). Schließlich können wir diesen Vorgang für einen Würfel wiederholen. In diesem Fall liefert ein Vergrößerungsfaktor von zwei genau acht ($2 \times 2 \times 2$) selbst-ähnliche Abbildungen. Wir bemerken die Entwicklung eines Musters, das wir mathematisch auf folgende Weise beschreiben können:

$$\text{Anzahl der selbst-ähnlichen Teile} = (\text{Vergrößerungs-Faktor})^D$$

D steht dabei die Dimension, z.B. ist die Dimension für einen Würfel drei. Im Fall der Koch-Kurve ist der Vergrößerungsfaktor drei und die Anzahl der selbst-ähnlichen Teile vier. Aus diesen beiden Größen können wir nun die Dimensionalität berechnen. Aus $3 = 4^D$ folgt $D = 1.262$. Das gilt für die

Koch-Kurve und für die kochsche Schneeflocke. Ein sehr bemerkenswertes Ergebnis, aber kann man es in der Natur anwenden?

Meteorologen beschäftigen sich immer häufiger mit der Selbst-Ähnlichkeit. Wenn wir verstehen, warum und wie fraktale Muster in der Natur vorkommen, dann können wir auch die zugrundeliegende Physik und die gegenseitigen Wechselbeziehungen der dazugehörigen Kräfte besser verstehen. Die fraktale Dimension von Eisteilen könnte eine wichtige Einsicht geben, wie diese sich formen und wie sie wachsen, vorausgesetzt wir beachten bestimmte Umgebungsbedingungen wie Außentemperatur, Wasserdampfgehalt, flüssiger Wassergehalt und turbulente Betriebsamkeit. Die sogenannte Kalte-Wolken-Mikrophysik ist oft schwierig zu verstehen, aber sie ist besonders wichtig für Niederschlagsvorhersagen. Die gleichen Aussagen gelten für die Analyse von Wolken, welche ebenfalls selbst-ähnliche Gebilde sind. Bei einem Versuch wurde durch das Auswerten von Lichtbildern erkannt, dass die fraktalen Dimensionen von Wolkenquerschnitten dem Wert $4/3$ neigen. Wir können hier nicht näher auf die Gründe eingehen, doch folgt, weil die Wolken als selbst-ähnliche Gebilde angenommen werden können, für die fraktale Dimension volumetrischer Wolken $D = 4/3 + 1$ oder $D = 7/3$. Nun fragt man sich, ob dies als allgemeiner Parameter gelten kann. Die Antwort ist wahrscheinlich nein, weil die fraktale Dimension von der Umgebung, in der sich die Wolken bilden, abhängt, und folglich von der Wolkenart.

7. Zusammenfassung

Die Atmosphäre ist fortwährend in einem Zustand des Übergangs und der Bewegung begriffen, da sie nach einem Zustand der Ausgeglichenheit zwischen den einzelnen Kräften, die auf sie einwirken, strebt. Ebenso wie für den vom Schicksal getroffenen Tantalos in der griechischen Mythologie bleibt der Zustand der Ausgewogenheit für unsere Atmosphäre unerreichbar: Die kreisende Erde wird ungleichmäßig erhitzt, Oberflächengegebenheiten führen zu Reibungsänderungen, das Strahlungsgleichgewicht wird durch die An- oder Abwesenheit von Wolken verändert und die Menschheit erschüttert die Ausgeglichenheit der Atmosphäre durch Umwelteinflüsse. Das Ergebnis dieser verschiedenen Einflüsse ist ein wundervoll vielschichtiges dynamisches System, das sich über einen weiten Bereich zeitlicher und räumlicher Skalen offenbart. Die Aussicht darauf, unsere Atmosphäre gründlich zu verstehen und eine angemessene Wettervorhersage zu machen, bleibt dennoch eher düster. Je mehr man in die Tiefe geht, um die verwickelten Wechselbeziehungen des Wettergeschehens zu verstehen,

desto schlechter scheinen die Aussichten auf Erfolg zu sein. Die Rettung kommt durch die Verhaltensmuster, die hinter dem zugrunde liegenden Chaos zum Vorschein kommen.

So wird aus der Kunde vom Wetter die Kunde der statistischen Analyse und der geschickten Erkennung von Verhaltensmustern. Auf grundlegender Ebene ist es wichtig, die Grenzen der Theorie der Turbulenz weiter zurückzuschieben und ein verlässliches Modell zur Beschreibung atmosphärischer Selbst-Ähnlichkeit zu erstellen. Fortschritte auf diesem Gebiet sind entscheidend, um einen klaren Gesamteindruck der Natur zu erhalten. Letztendlich müssen wir uns damit abfinden, dass immer Lücken in unserem Verständnis der Atmosphäre bestehen bleiben werden. Ferner schränkt die den atmosphärischen Strömungen innewohnende chaotische Natur unsere Möglichkeiten, ein deterministisches System mit Gleichungen, die das Wetter beschreiben, zu schaffen, erheblich ein. Aus diesem Grunde müssen die Meteorologen noch immer auf ihr Gespür vertrauen, wenn sie die verfügbaren Beobachtungen zusammen mit den Ergebnissen numerischer Wettervorhersagen auswerten. Obwohl wir einsehen müssen, dass wir nicht immer wissen können, wie die Atmosphäre sich verhält, können wir das Wetter von morgen oder übermorgen doch schon mit großer Wahrscheinlichkeit voraussagen. Dies setzt oft ein gründliches Verstehen bestimmter morphologischer Muster und von deren Bezug zum Wetter voraus. Am liebsten würden wir diese Erkenntnisse wissenschaftlich eingliedern und für objektive Wettervorhersagen verwenden, aber zum jetzigen Zeitpunkt ist das menschliche Mitwirken noch immer eine wichtige Zutat in der Einschätzung der Witterung.

Literaturverzeichnis

American Meteorological Society. (2000). *Glossary of Meteorology*.
Todd S. Glickman, managing editor, Boston.

Richardson, Lewis Fry. (1922). *Weather Prediction by Numerical
Process*. Cambridge: Cambridge University Press.

Prof. Dr. Phillip B. Chilson, School of Meteorology
Christa Chilson, Department of Modern Languages, Literatures and
Linguistics
University of Oklahoma
Norman, OK
USA