

Heil'ge Ordnung, segensreiche Himmelstochter [...]

Friedrich Schiller

Liebe Leserin, lieber Leser,

kommt die Rede beiläufig auf Astronomie, denkt mancher ans Wetter! Was für eine Zumutung! Hier eherne, erhabene Gesetze, dort das sprichwörtlich Unberechenbare. Hier Kosmos, dort Chaos. Größer könnte der Abstand kaum sein, oder? Aktueller Anlass, sich wieder einmal darüber auszulassen, ist ein 100. Geburtstag. Vor einhundert Jahren, am 23. Mai 1917 wurde Edward Norton Lorenz (gest. 2008) geboren. Er gilt als Vater des „Schmetterling-Effekts“! Der computerbegeisterte Meteorologe entdeckte vor einem halben Jahrhundert das deterministische Chaos. Wo? Am Computer! Genau genommen war's eine Wiederentdeckung. Auch wenn der Terminus „Chaos“ hervorragend auf's Wetter passt, die erste Ahnung von einer Welt, die, obwohl vorherbestimmt (determiniert), chaotische Züge trägt, hatte ein genialer Himmelsmechaniker, einer, der sich des vertrackten Drei-Körper-Problems annahm: Henri Poincaré (1854–1912).

Poincaré scheiterte an drei Körpern. Das soll uns nicht davon abhalten, der Frage nachzugehen, wie chaotisch es in einer „ordentlichen“ Galaxie zugeht bzw. zugeht, in der, sagen wir, 100 Milliarden Körper – Sonnen – gravitativ miteinander verbunden sind.

Übrigens, am 25. Mai ist „Handtuch-Tag“! Douglas Noël Adams (1952–2001) wäre am 11. März 65 geworden.

Ihr Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Mai

Venus ist Morgenstern. Sie geht in der Früh' vor der Sonne auf und baut im Verlaufe des Mai den Abstand zu ihr am Himmelsgewölbe aus.

Jupiter hat seine Opposition hinter sich, befindet sich aber immer noch im Oppositionsmodus, d. h., noch bewegt er sich rückläufig unter den Sternen, also im Uhrzeigersinn. Am Monatsende geht er kurz nach 3 Uhr MESZ unter.

Saturn befindet sich im gleichen Modus. Allerdings bewegt er sich beschleunigt rückläufig auf seine Opposition Mitte Juni zu. Saturnianer haben am 25. Mai gleich zweifach Grund zum Feiern: Der Adams-Gedenktag fällt mit dem Sommersbeginn auf deren Nordhemisphäre zusammen. Acht Jahre Frühling sind wahrlich genug. Von der Sonne aus gesehen, und für uns auch, sind die Saturnringe maximal offen.

Vorhersage bei Meteorologie und Astronomie

„Weshalb scheint uns das Eintreten von Regengüssen und Stürmen gänzlich vom Zufall abzuhängen, so daß manche Leute es für ganz natürlich halten, um Regen und gutes Wetter zu beten, während doch dieselben Leute es lächerlich finden würden, wenn man eine Sonnenfinsternis durch Gebet herbeiführen wollte?“

Henri Poincaré

Lorenz war nicht der erste, der sich an die numerische Modellierung des Wettergeschehens machte. 1917 verwandte Lewis Fry Richardson (1881–1953) Wetterdaten, die sieben Jahre zuvor im Laufe eines Tages (20. Mai 1910) bei Ballonaufstiegen gewonnen worden waren, zum Testen eines numerischen Wettermodells. Die Idee war nicht neu. Man wollte die atmosphärischen Vorgänge durch die Differentialgleichungen der Physik abbilden und rechnerisch (mit Hilfe von 60 000! menschlichen „Computern“) lösen, um so von einer auf Erfahrung¹ und Intuition basierenden zu einer physikalisch fundierten Wetterprognose zu gelangen. Vorbild waren für Richardson die astronomischen Jahrbücher, wo ja auch die zukünftige Stellung der Planeten und Monde auf der Lösung von Differentialgleichungen beruhte und nicht auf der Erinnerung an ähnliche Planetenkonstellationen in der Vergangenheit. Dieser frühe Physikalisierungsversuch scheiterte an der Ausführung: Richardsons Rechenschema war noch instabiler als das Wetter. Seine Idee indes war goldrichtig.

Der Wetter- und Turbulenzforscher war Visionär durch und durch. So „sah“ er als erster Fraktale in der Natur. (Die Küsten„linie“ Englands² beispiels-

¹Da sich Wetter nie 100%-ig wiederholt, nützt einem die Aufzeichnung vergangener Wetterverläufe wenig.

²Das Interesse an der Länge von Landesgrenzen erwachte in dem Konfliktforscher Richardson. Dieser meinte, das Konfliktpotential zwischen Nationen nehme mit

weise ist etwas mehr als eine Linie und deutlich weniger als eine Fläche.)

Richtig los ging es nach dem 2. Weltkrieg. Das erste „Elektronenhirn“, die ENIAC, wurden bereits zur Wettersvorhersage herangezogen, auch um den eigentlichen Zweck des Rechners, Rechnungen zur Kernphysik, zu verbergen. Inzwischen hatten Mathematiker wie John von Neumann³ (1903–1957), die durch die Göttinger Schule gegangen waren, Rechenverfahren⁴ ausgetüftelt, die numerisch stabil sind. Die ENIAC war anfänglich gerade schnell genug, um mit der Wetterentwicklung Schritt halten zu können. Mitte der 50er Jahre tauchten dann die ersten Klimamodelle auf, welche den Wärmeaustausch zwischen Tropen und den Polen durch die großräumige atmosphärische Zirkulation⁵ thematisierten.

Die Verbesserung bei der Wettersvorhersage ist beachtlich. Von der Güte her entsprechen heutige Drei-Tage-Vorhersagen den 1 1/2-Tage-Vorhersagen von vor 15 Jahren! Dennoch ist es ungeachtet eines immensen Rechenaufwands nicht möglich, das Wetter hierzulande auch nur über einen Zeitraum von, sagen wir, zehn Tagen vorherzusagen⁶. Das ist Ausdruck des deterministischen Chaos, dem Lorenz zufällig bei seiner Wettersimulation am Computer auf die Spur gekommen war. Der Meteorologe hatte Konvektion numerisch modelliert und dazu die Differentialgleichungen der Strömungslehre (Hydrodynamik) bis auf das unbedingt Notwendige abgerüstet. Er bemerkte, dass zuweilen bereits eine geringfügige Änderung der Eingangsdaten, wie sie beim Runden auftreten mag, zu einer dramatischen Änderung des prognostizierten Wettergeschehens führen kann. Meteorologen fürchten nichts mehr, als

der Länge der gemeinsamen Grenze zu.

³von Neumann hielt die Beherrschung des Wetters für wichtiger als die Beherrschung der Kernenergie. Er gedachte, sich des „Schmetterlingseffekts“ zu bedienen: Steht etwas auf der Kippe, reicht ein Schubs, um die Dinge sich in die gewollte Richtung entwickeln zu lassen . . .

⁴Es geht darum, die für die Wettersvorhersage unwesentlichen kurzweiligen Schwankungen (Schallwellen, Schwerewellen) herauszufiltern. Wie ausgefeilt und vertrauenswürdig inzwischen die numerische Hydrodynamik ist, erkennt man auch daran, dass die USA gestrotzt das internationale Teststoppabkommen (CTBT) 1996 unterzeichnen konnten. Man „testet“ Kernwaffen im Computer!

⁵Klimamodelle betrachten das Wechselspiel zwischen atmosphärischer und ozeanischer Zirkulation.

⁶Man kann ein Ensemble von Vorhersagen statistisch auswerten, wobei die jeweiligen Ausgangswetterlagen etwas variieren. Auf diese Weise werden Wahrscheinlichkeitsaussagen zur Wetterentwicklung möglich. Uns Europäern, die wir unter wechselhaftem Wetter leiden, nutzt dies allerdings wenig.

die „kleine Anomalie“ in dem Wust von Wetterdaten zu übersehen, in der sich der kommende Orkan ankündigt.

Die zeitliche Entwicklung des Lorenz'schen nicht-linearen dynamischen Systems lässt sich heutzutage graphisch in einem drei-dimensionalen Zustandsraum verfolgen. Es ist ein sog. *seltamer Attraktor*, ein (fraktales) Gebilde⁷ von verwirrender Komplexität. Eine minimale Änderung der Ausgangs(wetter)lage, beispielsweise bedingt durch unvermeidliche Messfehler, führt zu zeitlich exponentiell auseinanderlaufenden Trajektorien (Bahnen) im Zustandsraum.

Von der Himmelsmechanik zur Stelldynamik

Ende des 19. Jh., lange vor Edward Lorenz, war sich der französische Bergbauingenieur, Mathematiker, Physiker, Astronom, Erkenntnistheoretiker etc. Henri Poincaré sicher, dass dieser Makel der Unvorhersagbarkeit der vermeintlich exakten Himmelsmechanik anhaftet. Er schrieb 1908:

„Würden wir die Gesetze der Natur und den Zustand des Universums für einen gewissen Zeitpunkt genau kennen, so könnten wir den Zustand dieses Universums für irgendeinen späteren Zeitpunkt genau voraussagen. Aber selbst wenn die Naturgesetze für uns kein Geheimnis mehr enthielten, können wir doch den Anfangszustand immer nur näherungsweise kennen. Wenn wir dadurch in den Stand gesetzt werden, den späteren Zustand mit demselben Näherungsgrade vorauszusagen, so ist das alles, was man verlangen kann; wir sagen dann: die Erscheinung wurde vorausgesagt, sie wird durch Gesetze bestimmt. Aber so ist es nicht immer; es kann der Fall eintreten, daß kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen große Unterschiede in den späteren Erscheinungen bedingen; ein kleiner Irrtum in den ersteren kann einen außerordentlich großen Irrtum für die letzteren nach sich ziehen. Die Vorhersage wird unmöglich, und wir haben eine ‚zufällige Erscheinung‘.“

Das ist nicht mit Willkür zu verwechseln! Die Prinzipien der Physik, allen voran die Erhaltungssätze, sind einzuhalten. Sie engen den Spielraum des prinzipiell Erlaubten ein, wobei durchaus Platz⁸ für deterministisches Chaos

⁷Animationen des Lorenz-Attraktors findet man im Internet.

⁸Das weiter unten zu besprechende N -Körper-Problem läuft auf die Bestimmung einer Kurve im $6N$ -dimensionalen Phasenraum hinaus. Wegen zehn Erhaltungsgleichungen reduziert sich die Dimension des Problems auf eine Kurve in einem $(6N - 10)$ -dimensionalen Unterraum. Symmetrien erlauben eine weitere Reduktion des „Platzes“.

bleibt!

Man muss es leider in diesem Zusammenhang ansprechen: Planetarien sind zwar für die astronomische Bildung unentbehrlich, aber ihr mechanisches oder elektronisches Räderwerk nährt die Illusion von der Berechenbarkeit der Welt! Das gleiche trifft auf den Physikunterricht zu. Es werden fast immer nur solche Beispiele behandelt, die elementar berechenbar sind. Es sind Idealisierungen, die mit der hochgradig nicht-linearen Wirklichkeit wenig zu tun haben. Der Glaube an die Berechenbarkeit der Welt entspringt vermutlich dem Bedürfnis nach Kontrolle. Leider versperrt dieser Irrglaube den Blick auf die wunderbare Wirklichkeit.

Doch zurück zu Poincaré und der Planetenmechanik. Bewegen sich zwei gravitativ gebundene Massepunkte – man denke an Sonne und Erde – unter dem Einfluss ihrer Schwere umeinander, gibt es nur eine Lösung: die Keplersche. Ewig „ellipsen“ beide in einer Ebene um den gemeinsamen Schwerpunkt. Ein königliches Preisausschreiben aus dem Jahre 1885, bei dem es um die Langzeitstabilität des Planetensystems ging, also um eine *q u a l i t a t i v e* Fragestellung, veranlasste Poincaré, sich dem sog. N -Körper-Problem zuzuwenden, wobei $N > 2$ ist. Weil ihm das zu kompliziert war, konzentrierte er sich auf $N = 3$, wobei der dritte Körper obendrein nur ein Staubkörnchen sein soll, dessen Existenz der Bewegung der beiden anderen nichts anzuhaben vermag. Die Analyse selbst dieser Variante des Drei-Körper-Problems war niederschmetternd. Es gibt im Allgemeinen keine Lösung in geschlossener Form. Aussagen über das Lang-Zeit-Verhalten haben den Wert von Kaffeesatzleserei. Poincaré war entsetzt: Bei $N = 2$ ist die Welt noch in Ordnung, mit $N = 3$ beginnt das Chaos! Er konnte das nur negativ sehen. Wir Heutigen gewinnen dem deterministischen Chaos inzwischen positive Seiten ab. An seinem Rand ist das Chaos durchaus *k r e a t i v*.

Da ist nichts zu beschönigen. Die Himmelsmechaniker vor Poincaré, darunter Genies wie Gauß (1777–1855), sie hatten sich alle etwas vorgemacht! Sie hatten insgeheim darauf gebaut, dass ihre Reihenentwicklungen der Störungen stets konvergieren und niemals ausufern. Die Hoffnung auf reguläres Verhalten aber ist unbegründet, und die Tatsache, dass in einem System von N Massepunkten ein einfaches Gesetz herrscht, garantiert nicht, dass sich das System „einfach“ verhält.

An dieser Stelle ist ein Nachtrag fällig. Wie der Kosmos-Bote gerade noch rechtzeitig bemerkte, hatte die N -Körper-Angelegenheit ein unerwartetes Nachspiel. Poincaré hatte nämlich lediglich gezeigt, dass *s e i n e* Methode

nicht zum Ziele führt. 1912 fand der finnische Mathematiker und Himmelsmechaniker Karl Frithiof Sundman (1873–1949) tatsächlich die vom König Oscar II. von Schweden und Norwegen geforderte Lösung der Aufgabe für $N = 3$! Er hätte den Preis gewonnen, wäre er 22 Jahre früher darauf gekommen! 1991 schließlich hat ein chinesischer Student namens Qiudong Wang das $N > 3$ -Problem mit gewissen Einschränkungen global gelöst. Dass das Problem eine Lösung hat, überrascht nicht. Die Natur findet schließlich immer eine Lösung. Dass es mit Reihenentwicklungen geht, hatten Mathematiker nicht erwartet. Für den Himmelsmechaniker schließlich ändert sich rein gar nichts: Die monströsen Reihen konvergieren zwar, aber sehr sehr langsam. Sie sind theoretisch preiswürdig und praktisch wertlos!

Unser Sonnensystem umfasst neben der Sonne wenigstens acht Planeten, viele Monde und eine Unzahl von weiteren Kleinkörpern. Es reicht, wenn ein einziger dieser Himmelskörper sich auf einer chaotischen Bahn bewegt, um die Zukunft des gesamten Systems in Frage zu stellen. Chaotisch meint, dass zwei anfänglich benachbarte Trajektorien im Laufe der Zeit exponentiell auseinander driften. (Bei reguläreren, quasi-periodischen Bahnen entfernen sie sich auch, aber linear mit der Zeit.) Vom Pluto, weiß man dank numerischer Simulationen des äußeren Planetensystems, dass jede noch so kleine Unsicherheit bezüglich seines gegenwärtigen Aufenthaltsorts und seiner momentanen Geschwindigkeit dazu führt, dass niemand auch nur annäherungsweise zu sagen vermag, wo im Sonnensystem er sich in 100 Millionen Jahren aufhalten wird. Man muss leider feststellen, den Himmelsmechanikern ergeht es nicht besser als den Meteorologen, nur dass ihr Vorhersagehorizont bei Dutzenden von Millionen Jahren liegt – was kurz ist verglichen mit dem Alter des Sonnensystems! –, und nicht bei einer Woche, was kurz ist verglichen mit einem Menschenleben.

Die Himmelsmechanik, wo das deterministische Chaos zum ersten Mal „geschaut“ worden war – Poincaré sprach von einem „homoklinen Gewirre“ —, befasst sich mit der Bewegung von Planeten und Monden unter dem Einfluss des Schwerefelds einer dominierenden Zentralmasse. Die Planeten umkreisen die Sonne, Monde ihren Planeten. Daneben gibt es aber auch von der Schwerkraft zusammengehaltene Ansammlungen von Sternen, Sternhaufen und sogar Galaxien ohne dominierende Zentralmasse. In einem Kugelsternhaufen beispielsweise zerren an jedem Stern die Anziehungskräfte aller anderen Sterne. Ein jeder Stern trägt das seine zum kollektiven Schwerefeld bei. Die Beschreibung derartiger Sternsysteme obliegt der *Stellardynamik*.

n a m i k. Bildlich hat man es mit einer sich entwickelnden Punktwolke zu tun, vergleichbar einem Vogelschwarm, wobei die Kraft, die auf einen dieser Punkte wirkt, sich aus der vektoriellen Summe der Anziehungskräfte aller anderen Sterne ergibt. Solche Probleme sind wie geschaffen für einen Computer. Das Kraftgesetz, Newtons Gravitationsgesetz, ist denkbar einfach: Die Kraft fällt betragsmäßig mit dem Quadrat des Abstandes. Jede Kraft beschleunigt und ändert dadurch die Geschwindigkeit. Daraus ergibt sich (durch zweimalige Integration über der Zeit) der Bahnverlauf. Und der ist entweder quasi-periodisch oder halt chaotisch, in jedem Fall alles andere als einfach.

Angesichts von Hunderten von Milliarden Sternen in einer prominenten E-Galaxie wäre damit ein jeder Computer überfordert. Außerdem, wen interessiert schon, welche Bahn der Stern XYZ... einschlägt. Es ist wie in der Gasphysik, der kinetischen Theorie der Gase, wo sich niemand für das einzelne Atom oder Molekül interessiert. Nur gemittelte Größen sind von Interesse: Dichte, Druck, Temperatur etc., wobei die Mittelung über räumliche Bereiche erfolgt, die viele Sterne enthalten. Eine stellar-statistische Beschreibung muss her.

(Wird wegen Überlänge im Juni fortgesetzt!)