

Paper-ID: VGI_199617



Ordnung am Rande des Chaos: ein neues Naturgesetz

Adrian E. Scheidegger ¹

¹ *Technische Universität Wien, Abteilung Geophysik, Gusshausstraße 27-29/1 28, A-1040 Wien*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **84** (1), S. 69–74
1996

Bib_TE_X:

```
@ARTICLE{Scheidegger_VGI_199617,  
Title = {Ordnung am Rande des Chaos: ein neues Naturgesetz},  
Author = {Scheidegger, Adrian E.},  
Journal = {VGI -- {"0}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {69--74},  
Number = {1},  
Year = {1996},  
Volume = {84}  
}
```





Ordnung am Rande des Chaos: ein neues Naturgesetz

Adrian E. Scheidegger, Wien

Zusammenfassung

In der Natur gibt es unzählige Beispiele der Entstehung von relativ stabilen, selbststrukturierten geordneten Zuständen am Rande von Chaos. Diese Selbststrukturierung der Systeme war bislang eine vollkommen empirisch gestützte Beobachtung: Computer-Simulationen von vielen nichtlinearen Systemen ergaben die Entstehung von solchen geordneten Zuständen; sie sind zeitlich durch $1/f$ -Rauschen in der spektralen Leistungsdichte und räumlich durch Fraktalität charakterisiert; letztere beinhaltet auch ein Exponentialgesetz für räumliche Untermengen. Die Regelmäßigkeit, mit der solche geordnete Zustände immer wieder entstehen, hat zur Vermutung eines neuen Naturgesetzes geführt:

„Offene nicht-lineare komplexe Systeme erreichen quasi-stationäre Zustände am Rande von Chaos, deren zeitliche Signatur ($1/f$ -Rauschen und deren räumliche Signatur Fraktalität mit einer viel kleineren Dimension als die des Phasenraumes ist“.

Damit aber ein Satz als Naturgesetz erkannt und akzeptiert wird, genügt es nicht, daß er *wahr* ist, – man muß auch *wissen*, daß er wahr ist und man muß erklären können, *warum*. Wir unternehmen in dieser Arbeit, diese Forderungen zu erfüllen, so daß die vermutete Existenz eines neuen Naturgesetzes endlich theoretisch begründet werden kann.

Abstract

Order at the Edge of Chaos: a New Natural Law. – In Nature, there are innumerable examples of the emergence of relatively stable self-organized ordered states at the edge of chaos. The emergence of such states had heretofore been an entirely *Empirically* observed occurrence: Computer simulations of many nonlinear systems have led to the establishment of order whose fingerprint is temporally $1/f$ -noise and spacially fractality (the latter implying a power-law for the number of spacial subsets). The frequency of the occurrence of such states has led to the conjecture of the existence of a new natural law.

„Nonlinear open complex systems develop quasi-stationary ordered states whose temporal signature is $1/f$ -noise and whose spacial signature is fractality with a dimension vastly lower than that of the phase space“.

However, for a natural law to be recognized as such it is not enough that it is true, one must also *know* that it is true and be able to explain *why*. We propose to fulfill these requirements in this paper, so that the conjecture of the existence of a new Law of Nature can at last be considered as theoretically substantiated.

1. Einleitung

In der Natur gibt es unzählige Beispiele von Selbststrukturierung von Elementen in Systemen am Rande des Chaos. Beispiele dafür findet man in der Astrophysik bezüglich Galaxien und Sonnenfackeln [1]; in der Geophysik bezüglich der fraktalen Dynamik von Erdbeben [2]; in der Geomorphologie bezüglich Minirutschungen an Sandhaufen [3] und in den Biowissenschaften bezüglich der „Darwinschen“ Theorie der Evolution [13]). Der gegenwärtige Autor kam auf die Häufigkeit von solchen Selbststrukturierungen vor allem aus dem Studium von Landschaften (Geomorphologie): Ein geordneter Zustand entsteht von selbst in einem komplexen System allein auf Grund der (meist sehr nichtlinearen) Wechselbeziehungen zwischen den Elementen des Systems und nicht auf Grund eines „äußeren“ Ordnungsprinzips.

2. Systemtheorie

Die Grundlage für die weiteren Ausführungen bildet die Kenntnis der Theorie der komplexen Systeme: Ein *System* [4] besteht aus einer Menge von Elementen, die durch variable Attribute gekennzeichnet sind, deren Werte den Zustand des Systems charakterisieren. Die Evolution des Systems ist dann die Folge der Existenz einer Reihe von Beziehungen zwischen den einzelnen Attributen untereinander und zwischen den Attributen und der „Umgebung“; sie ist durch eine Trajektorie im Phasenraum (d.h. im Raum, in dem eine Axe oder Dimension jedem Attribut entspricht) beschrieben; die schlußendliche Evolution jedes Systems ist durch Attraktoren bestimmt, gegen welche zu die Trajektorien konvergieren. Solche Attraktoren sind manchmal reguläre Kurven (Kreise, Schlaufen) im Phasenraum; – dann tendieren die Systeme zu absoluter

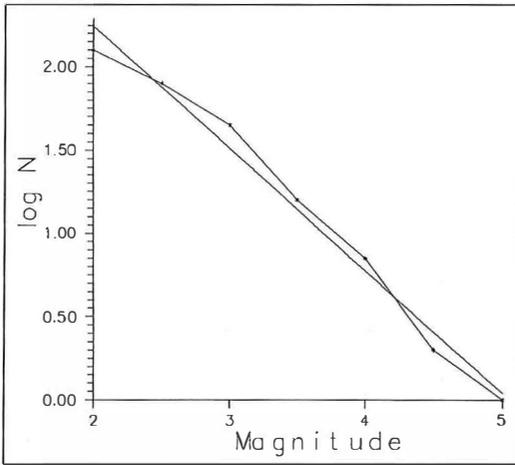


Abb. 1: Gutenberg-Richter Kurve für die 126 Erdbeben der Jahre 1971–1980 in Österreich mit Magnitude $M > 2$, berechnet aus Daten publiziert von Drimmel und Trapp [6]. Für die Koeffizienten findet man $a = 3,71$; $b = 0,73$.

Stabilität; – oder aber „seltsame“ Attraktoren: Kurven (Punktmengen), die nirgendwo differenzierbar sind und eine fraktale Dimension haben.

Die Wechselwirkung eines *offenen* Systems mit der „Umgebung“ ist durch eine Reihe von Parametern bestimmt, die die Grenz- und Anfangsbedingungen (wie etwa die Temperatur oder den Energiefluß an der Grenze) festlegen. Die Parameter-Werte (die innerhalb eines mehrdimensionalen Parameter-Raumes variieren können) geben an, welche Attraktoren im Phasenraum den Systemzustand kontrollieren; verschiedene Regionen des Parameter-Raumes können ganz verschiedene Abläufe des Systems in vollkommen von einander getrennten Regionen des Phasenraumes bewirken.

3. Empirische Beobachtungen

Wie schon erwähnt, haben unzählige Beobachtungen von komplexen Systemen zur Feststellung einer oftmals von selbst entstehenden geordneten quasi-stationären Strukturierung am Rande der Kritikalität geführt. So wurde z.B. gefunden, daß die charakteristischen Parameter in solchen quasi-stationären Zuständen, wie sie durch die Höhenverteilung in einer bestimmten Landschaft, durch die Massenverteilung im Universum oder diejenige in einem Sandhaufen repräsentiert sind, räumlich und zeitlich Maßstabunabhängig sind: sie sind fraktal verteilt. In einer fraktalen Menge der Dimension D gibt es ein Exponentialgesetz für Untermengen: Die Zahl N von Untermengen der (linearen) „Größe“ L ist

proportional zu $L \exp(-D)$. Solche Exponentialgesetze wurden in der Tat auch in komplexen natürlichen Systemen gefunden: Am berühmtesten ist wohl das Gesetz von Gutenberg und Richter [10] für die Zahl N von Erdbeben mit einer Magnitude $> M$ für einen gegebenen Zeitraum und ein gegebenes Gebiet (a und b sind Konstanten; a hängt von der Größe des Zeitraumes und der gewählten Region ab; b ist ein „tektonischer Parameter“ mit $0,7 < b < 1,2$)

$$\log N(M) = a - bM$$

Wenn diese Beziehung mit Bezug auf die Energie E ($M = c \log E$) ausgedrückt wird, ergibt sich ein Exponentialgesetz: Abb. 1 zeigt die Gutenberg-Richter Kurve für die 126 Erdbeben Österreichs der Jahre 1971–1980 mit $M > 2$, konstruiert aus Daten publiziert von Drimmel und Trapp [6]. Für die Koeffizienten findet man $a = 3,71$; $b = 0,73$.

Wie gesagt, ist alles Obige eine „induktive“ Vermutung aus Beobachtungen und Experimenten. Es gibt keine eigentliche Theorie, warum

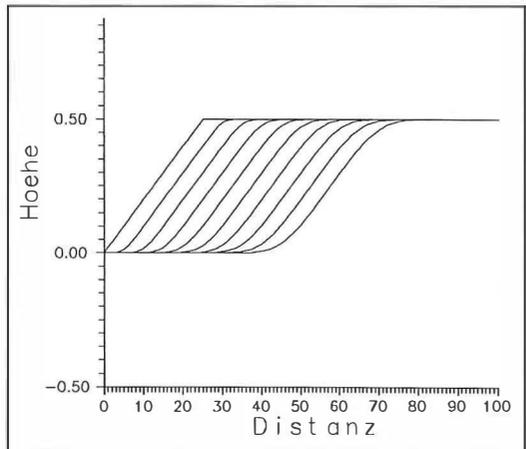


Abb. 2: Geordnete Entwicklung einer einfachen Hangstufe, berechnet nach den Gleichungen von Scheidegger [18]

komplexe Systeme fraktal sein sollen und warum sich eine Selbststrukturierung ihrer Elemente immer nur am Rande des Chaos entwickeln soll. Die Prozesse (von Landschafts-Entwicklung, Sandhaufen-Bildung, Erdbebenherdbildung usw.) wurden auf Computern nachgebildet; wenn man mit den Wechselwirkungen zwischen Elementen eines hypothetischen Systems lange genug herumspielt, kann man in der Tat auf Attraktoren kommen, die eine Selbststrukturierung am Rande der Kritikalität darstellen: dabei bedeutet das Wort „Kritikalität“, daß sehr geringe

Änderungen in den Anfangsbedingungen oder in den Werten der „Parameter“ eine Instabilität bewirken. Als Beispiel zeigen wir hier (Abb. 2) die geordnete Entwicklung einer einfachen Hangstufe, berechnet nach den Gleichungen von Scheidegger [18]; sobald man aber an der oberen Kante eine kleine Kerbe einfügt, also die Anfangsbedingungen etwas ändert, wird die Entwicklung instabil (Abb. 3).

So scheint sich die „Ordnung“ immer am „Rande des Chaos“ auszubilden, und man vermutet, daß diese Entstehung von Ordnung am Rande des Chaos ein allgemeines Naturprinzip [12,16,13] darstellen könnte. Bak et al. [3] haben bemerkt, daß derartige geordnete Zustände am Rande des Chaos zeitlich durch $1/f$ -Rauschen [7] und räumlich durch eine skaleninvariante (fraktale) Struktur gekennzeichnet sind; bezüglich von „Lebensystemen“ hat Kauffman diese Vermutung sogar als Hypothese ausgesprochen ([13] S. 232): „Lebensysteme existieren im zusammenhängenden Regime am Rande des Chaos, und natürliche Selektion bewirkt und unterhält einen derartigen kritischen Zustand.“ Kauffman [13] gründete diese Hypothese auf das empirische Verhalten von Systemen mit Booleschen Attributen: Er fand durch unzählige Computersimulationen, daß Systeme von N Elementen mit Booleschen Attributen, wo jedes Attribut durch genau $K=2$ Elemente mittels zufallsmäßig vorgegebenen Booleschen Funktionen (so daß das System durch ein zufallsmäßiges Boolesches Netz repräsentiert wird), sich zu wohlgeordneten Systemen entwickeln, die wenige Attraktoren besitzen, die ziemlich (bezüglich der Auslassung eines Elementes oder der Änderung einer Booleschen Funktion) stabil sind.

4. Vermutung eines „Naturgesetzes“

So entspricht die spontane Entstehung von „Ordnung am Rande von Chaos“ Beobachtungstatsachen; die charakteristischen Züge des Phasenraumes am Rande des Chaos sind Erfahrungstatsachen; sie sind auch unzählige Male für nichtlineare Systeme auf Computern simuliert worden. Nichtsdestoweniger können Computer-Simulationen die Beobachtungen immer nur a posteriori nachvollziehen: Sie können *nie* einen Grund angeben, *weshalb* eine derartige beobachtete Entwicklung immer wieder stattfinden soll: Es kann lediglich gezeigt werden, daß derartige Selbststrukturierungen *möglich* sind, niemals aber, daß sie sich ereignen *müssen*. Das häufige Entstehen von selbst-strukturierten kritischen Zuständen in der Natur und, in der Tat,

Zeigen Sie's allen!

WinGIS™

Einfach in der Bedienung

- ▶ Offenes System
- ▶ Objekt orientiert
- ▶ Funktionell
- ▶ optimales Preis/Leistungsverhältnis



Das professionelle Geographische Informationssystem, um Daten auf Karten zu visualisieren.

- Leitungsbetreiber (Öl, Gas, Wasser, Elektrizität etc.)
- Ökologie-Ökonomie-Techn. Büros
- Business Geographie
- Handel-Gewerbe-Industrie
- Statistiken-Universitäten

- Grafik- und Datenbankabfragen beidseitig möglich
- Visualisieren Sie Ihre Daten durch: Variantenkarten, Businessgrafiken und Beschriftungen von Objekten aus der Datenbank
- Multi-Media Verknüpfungen
- Grafik- und Datenbank-Monitoring
- Grafikeditor mit zahlreichen Funktionalitäten und einer großen Anzahl von Schnittstellen (Archnfo, Sicaad, ASCII, DXF, ALK-GIAP, DKM, GRIPS, Intergraph), um Daten zu importieren und zu exportieren.
- Sehr hohe Geschwindigkeit durch objektorientierte Programmierung



PROGIS w. H. M.™
Software, die's zeigt!

WinGIS™, WinMAP™, WinMAP LT™, WinGIS™ Entwicklungsstation,
Russische Satellitenfotos mit 2-5m Auflösung

Österreich Tel:+ 43(0)42 42126332, Fax:+43(0)42 421263327 / USA Tel:+1 (360)738-2419, Fax:+1 (360)738-2798 / Singapur Tel:+65 286-4445, Fax:+65 282-3126 / Moskau Tel:+Fax: +7 (095)3325471

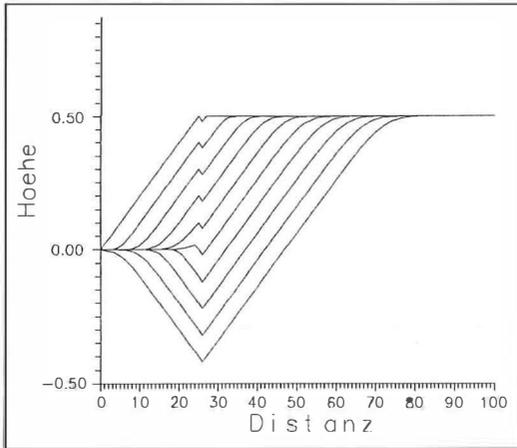


Abb. 3: Wirkung einer kleinen Kerbe an der oberen Hangkante: Die Hangentwicklung wird instabil

auch in anthropogenen (wie z. B. sozialen oder ökonomischen) Systemen suggeriert aber die Existenz eines entsprechenden universellen Naturgesetzes:

„Offene nicht-lineare komplexe Systeme erreichen quasi-stationäre Zustände am Rande von Chaos, deren zeitliche Signatur $(1/f)$ -Rauschen und deren räumliche Signatur Fraktalität mit einer viel kleineren Dimension als die des Phasenraumes ist“.

Daher ist es erforderlich, grundlegendere Einsichten als Computersimulationen in die Bedingungen, welche die Selbststrukturierung komplexer Systeme bewirken, zu erhalten. Damit ein Satz als „Naturgesetz“ erkannt und akzeptiert wird, genügt es nach Cohen und Stewart [5] nicht, daß er *wahr* ist; man muß auch *wissen*, daß er wahr ist, und man muß obendrein noch erklären können, *warum* er wahr ist. Wir nehmen uns vor, diese Bedingungen zu erfüllen: Die zwei grundlegenden Ideen, die dazu notwendig sind, wurden schon vom Autor in einer Kurzfassung publiziert [19]; hier wollen wir eine volle Beschreibung des Gedankenganges geben.

5. Notwendige Bedingungen

Man kann vorerst nach Bedingungen suchen, die für die spontane Entstehung eines quasi-stationären, geordneten Zustandes in einem nichtlinearen, komplexen System *notwendig* sind.

Die meisten der betrachteten Systeme (Landschaften, Galaxien, „Leben“ an sich) sind in einem gewissen Sinne „evolutionär“: Sie entstehen und vergehen; ihre Elemente werden „geboren“ und „sterben“. Offensichtlich muß die Ge-

burtsrate der Elemente gleich der Sterberate sein, damit sich ein (quasi-)stationärer Zustand entwickeln kann; andernfalls hätte man eine totale Vernichtung oder exponentielle Explosion des Systems: Man sieht, daß der quasistationäre Zustand ein kritischer ist.

Weiters müssen alle evolutionären Systeme offen und dissipativ sein; daher gelten die „normalen“ thermodynamischen Gesetze (die für geschlossene Systeme konzipiert wurden) nicht: Die Prozesse, die in solchen Systemen ablaufen, sind grundsätzlich irreversibel und es gelten die Gesetze der Thermodynamik irreversibler Prozesse; – insbesondere gilt der zweite Hauptsatz der Thermodynamik *nicht* in seiner üblichen Form: Prigogine [17] hat bemerkt, daß die Entropie in offenen Systemen sehr wohl während der Annäherung an einen stationären Zustand *abnehmen* kann, – d.h ihr Wert im stationären Zustand kann sehr wohl kleiner sein als im „absoluten“ Gleichgewichtszustand (Tod). In der linearen Theorie besteht ein Theorem der minimalen Entropieproduktion für stationäre Zustände: Jede (kleine) Störung klingt in solchen stationären Zuständen immer ab, die stationären Gleichgewichtszustände sind im Wesentlichen im Raum gleichverteilt, falls die äusseren Bedingungen dies zulassen. Die spontane Entwicklung von geordneten Zuständen, bei denen die räumlichen oder zeitlichen Abläufe vom endgültigen Gleichgewicht (Tod) verschieden sind, ist bei solchen Systemen unmöglich. Obendrein wird jegliche andere Art von Ordnung, die durch die Anfangsbedingungen dem System aufgezwungen worden war, während der Evolution zum stationären Zustand hin zerstört ([16], S. 46). Somit ist Nichtlinearität der Beziehungen zwischen den Elementen eine notwendige Bedingung für die Möglichkeit der spontanen Entstehung von Ordnung.

6. Kausative Bedingungen

Ein Versuch, grundlegende Bedingungen für die Entwicklung von spontaner Ordnung in komplexen Systemen zu formulieren, wurde von Haken [11, 12] mit seinem „Versklavungs-Prinzip“ gemacht. Dieses Prinzip beinhaltet, daß das Gehen eines komplexen Systems in der Umgebung von kritischen Stellen vollkommen durch wenige kollektive Parameter, die sogenannten Ordnungs-Parameter, bestimmt ist, welche alle anderen Parameter „versklaven“. In der Tat kann man zeigen, daß das Versklavungsprinzip von Haken der Aussage äquivalent ist, daß für einen geordneten Zustand der entsprechende (seltsame) Attraktor eine Dimension hat, die sehr

viel kleiner ist als die des gesamten Phasenraums: dies verhindert, daß das System über den gesamten Phasenraum wandert (= komplettes Chaos) und engt es auf eine kleine Region desselben ein (= „relative“ Ordnung oder „niedrig-dimensionales Chaos“; siehe Kauffman [13], S. 178–179). In der Tat verlangt der Begriff Ordnung an sich, daß von allen möglichen Zuständen des Systems nur wenige erlaubt sind.

Als Nächstes kann man sich fragen, warum ein stationärer Zustand am Rande des Chaos einen fraktalen Attraktor hat. Wir haben oben gesehen, daß „Ordnung“ ex definitione verlangt, daß der entsprechende Attraktor eine Dimension haben muß, welche sehr viel kleiner ist als die Dimension



Abb. 4: Guslarspitze im Rofental ob Vent in Tirol, als Beispiel der Wirkung des Selektionsprinzips in der Landschaft: Die Pyramide ist eine statisch stabile Form und wird daher immer wieder bei der Erosion „herausselektioniert“. – Photo AES 12/07/1987-LJ22

des gesamten Phasenraumes; es besteht jedoch keine Bedingung, daß diese Dimension ganzzahlig sein sollte: wenn sie nicht ganzzahlig ist, dann ist sie eben fraktal; – eine andere Möglichkeit gibt es nicht. Und da die Menge der nicht-ganzen Zahlen sehr viel größer ist als diejenige der ganzen, ist es natürlich auch sehr viel wahrscheinlicher, daß die besagte Dimension im Allgemeinen fraktal und nur ganz zufällig ganzzahlig ist.

Der geordnete Zustand am Rande des Chaos muss wenigstens eine Zeit lang (quasi-) stationär bleiben; – sonst kann er gar nicht „gesehen“ (beobachtet) werden: er darf also bei kleinen Änderungen der Parameter nicht gerade auf einen *vollkommen* anderen Attraktor springen. Instabilitäten innerhalb des (seltsamen) Attraktors können durch zufallmäßige Fluktuationen oder durch externe Wirkungen hervorgerufen werden. Letztere wurden oft als „Schmetterlings-Effekte“ bezeichnet: Ein Schmetterling, der seine Flügel in Peking schlägt, bewirkt einen Luftzug, der eine Instabilität in der Atmosphäre erzeugt, welcher schluß-

endlich ein Gewitter in New York zur Folge hat [14]. In mathematischer Terminologie ist dies das Resultat einer Lyapunov-Instabilität [15]: die (kleinen) anfänglichen Distanzen zwischen Trajektorien auf dem betreffenden Attraktor wachsen exponentiell mit der Zeit (dies ist der Fall beim Lorenz Attraktor [14], der Wettersysteme modelliert); der betreffende Koeffizient heißt „Lyapunov Koeffizient“ (Dimension 1/T): wenn er positiv ist, ist das System instabil. Eine drastischere Instabilität entsteht, wenn die Veränderung der Parameter-Werte das System von einem Attraktor auf einen anderen befördert: dies bedeutet eine „Katastrophe“ im Sinne von Thom [20]. So ersieht man, daß geordnete Zustände die *Einzigen* sind, welche eine gewisse Dauer haben: es gibt sozusagen eine „Darwinsche Selektion“ mit Beziehung auf solche geordnete Zustände, die ähnlich wie die statisch stabilen Formen in Landschaften nach dem Selektionsprinzip von Gerber [8] selektioniert werden: Das klassische Beispiel hierfür ist das Matterhorn in der Schweiz; das Selektionsprinzip wird aber auch durch viele „Spitzen“ in Österreich vor Augen geführt: die Pyramide ist eine statisch stabile Form und wird daher immer wieder bei der Erosion „herausselektioniert“; als Beispiel diene die Guslarspitze im Rofental ob Vent in Tirol (Abb. 4). Ganz generell können in einem System nur diejenigen Zustände „gesehen“ (und beobachtet) werden, die von einer gewissen Dauer sind. Dies ist auch die Erklärung dafür, warum Evolutionen jeglicher Art „punktuerte Gleichgewichtszustände“ [9] durchlaufen: Terrassen werden in Landschaften gebildet, biologische Arten ändern sich manchmal sehr rasch, um dann Hunderte von Jahrmillionen (primitive Insekten) stabil zu bleiben etc. Somit ist erklärt, *warum* Ordnung aus Chaos entsteht, und man kann das oben vermutete Naturgesetz gemäß den Kriterien von Cohen und Stewart [5] als *gesichert* betrachten.

Literatur

- [1] Bak, P. „Self-organized criticality in astrophysics“, in A. Lejeune and J. Perdang J. (eds.) „Cellular Automata Models for Astrophysical Phenomena“. Singapore: World Scientific Press, 1993.
- [2] Bak, P., Tang, C. „Earthquakes as self-organized critical phenomenon“. J. Geophys. Res., 94: 15635–15637, 1989.
- [3] Bak, P., Tang, C., Wiesenfeld, K. „Self-organized criticality“. Phys. Rev. A38: 364–374, 1988.
- [4] Bertalanffy, L.v. „Theoretische Biologie“. Berlin: Springer, 170 S., 1932.
- [5] Cohen, J., Stewart, I. „The Collapse of Chaos“. New York: Viking Press 495 S. 1994.
- [6] Drimmel, J., Trapp, E. „Die Erdbeben Österreichs 1971–1980“. Sitz.-ber. Österr. Akademie Wiss., Math.-natw. Kl., Abt.I, 191(1-4): 73–102, 1982.
- [7] Dutta, P., Horn, P.M. „Low-frequency fluctuations in solids: 1/f noise“. Revs. Mod. Phys. 53(3): 497–516, 1981.

- [8] Gerber, E.K. „Bildung von Gratpfeln und Felswänden in den Alpen“. Z. Geomorph. Suppl. 8: 94–118, 1969.
- [9] Gould, S.J., Eldredge, N. „Punctuated equilibrium comes of age“. Nature 366: 233–227, 1993.
- [10] Gutenberg, B., Richter, C.F. „Seismicity of the Earth and Associated Phenomena“. Princeton: Princeton University Press, 211 S., 1949.
- [11] Haken, H. „Generalized Ginzburg-Landau equations for phase transition-like phenomena in lasers, nonlinear optics, hydrodynamics and chemical reactions“. Z. Physik B21: 105–114, 1975.
- [12] Haken, H., Wunderlin, A. „The slaving principle of synergetics“. In: Lundqvist, S., March, N.H. and Tosi, M. (Eds.) „Order and Chaos in Nonlinear Physical Systems“. New York/London: Plenum Press S. 467–463, 1988.
- [13] Kauffman, S.A. „The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution“. Oxford: Oxford University Press, 709 S., 1993.
- [14] Lorenz, E.N. „Deterministic nonperiodic flow“. J. Atmosph. Sci. 357: 130–141, 1963.
- [15] Monin, A.S. „Union Lecture: Predictability of chaotic phenomena“. Chronique de l'Union Geodesique et Geophysique Internat. 208: 268–282, 1991.
- [16] Nicolis, G., Prigogine, I. „Self-Organization in Non-Equilibrium Systems.“ 8th printing, New York: Wiley 491 S., 1977.
- [17] Prigogine, I. „Etude thermodynamique des phenomenes irreversibles“. Liege: Desoer, 143 S., 1947.
- [18] Scheidegger, A.E. „Mathematical models of slope development“. Bull. Geological Society Am., 72: 37–50, 1961.
- [19] Scheidegger, A.E. „Order at the edge of chaos in geophysics“. Abstracts IUGG XXI General Assembly 1: A-11, UA51A-10, 1995.
- [20] Thom, R. Stabilität Strukturelle et Morphogenese. Reading, Pa.: Benjamin 362 S., 1972.

Anschrift des Autors:

Em. o. Univ.-Prof. Dr. Adrian E. Scheidegger, Technische Universität Wien, Abteilung Geophysik, Guss-
hausstraße 27–29/128, A-1040 Wien

Dissertationen und Diplomarbeiten

3D-Gleiserfassung mit einem Multisensorsystem und linearen Filterverfahren

Günther Retscher

Dissertation: Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Abteilung Ingenieurgeodäsie, TU Wien, 1995. Begutachter und Betreuer: o.Univ.-Prof. Dr. H. Kahmen, 2. Begutachter: o.Univ.-Prof. Dr. E. Brückl.

Große Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Verfahren zur Bestimmung, Kontrolle und Absteckung von Gleisen werden insbesondere bei der Neuverlegung von Schienensträngen für Hochgeschwindigkeitsbahnen oder beim Bau der sog. Festen Fahrbahn gestellt. In erster Linie führten wirtschaftliche Überlegungen zur Entwicklung eines neuen Aufnahme- und Auswertekonzepts für die Gleisvermessung, da herkömmliche Verfahren einen geringen Grad an Automation und Flexibilität aufweisen und einen relativ hohen Meßaufwand erfordern.

Das Prinzip des neuen Verfahrens beruht auf der Bestimmung des gesamten Gleisstreifens mit seinen Kenngrößen 3D-Position der Gleisachse bzw. einer Fahrkante, Spurweite und Überhöhung. Das Meßsystem besteht im wesentlichen aus einer dreidimensionalen Positionierungseinheit und elektronischen Meßwertgebern in Verbindung mit einem Prozeßrechner. Die einzelnen Komponenten befinden sich auf einem eigens entwickelten Meßwagen, der sich in dem zu untersuchenden Gleiskörper bewegt. Der Meß- und Auswerteprozess läuft rechnergesteuert in einem Regelkreis weitgehend automatisch ab.

Die 3D-Aufmessung des Gleisstreifens ermöglicht die Durchführung der Lage- und Höhenaufnahme sowie der absoluten und relativen Gleisaufnahme in nur einem Arbeitsablauf. Neben elektronischen Meßrobotern können auch Systeme für GPS-Echtzeitvermessung (Real Time Kinematic GPS) eingesetzt werden. Aus einem Vergleich der berechneten Istlage mit der Soll-Gleislage

im 3D-Raum gewinnt man absolute Verschiebewerte zur Gleiskorrektur. Mit dem Shannonschen Abtasttheorem kann ein optimales Abtastintervall gefunden werden, das durch eine Genauigkeitsanalyse von Meßergebnissen bestätigt wird.

Für die Auswertung werden Algorithmen eingesetzt, bei denen die Meßdaten wahlweise direkt während der Aufnahme (on-line) als auch im nachhinein (off-line) verarbeitet werden. Eine Anwendung der Kalman-Filterung wird für den on-line Betrieb und die Wiener-Filterung bzw. Kollokation für off-line Auswertungen vorgeschlagen. Ausgehend von den theoretischen Grundlagen erfolgt eine Modifizierung und Anpassung der mathematischen Modelle an die Besonderheiten für die Auswertung einer 3D-Gleisaufnahme. Die Umsetzung der Algorithmen erfolgt durch die Entwicklung einer neuen Software.

Im Zuge der Auswertung einer Reihe von Gleisaufnahmen kann die hohe Genauigkeit des modernen Aufnahmeverfahrens sowohl für die Bestimmung der absoluten als auch der relativen Gleislage bzw. Krümmung nachgewiesen werden. Das Verfahren ist universell für die Überprüfung der Gleislage von bestehenden Eisenbahntrassen sowie bei der Neuverlegung von Schienen einsetzbar. Die Methode kommt ohne kostenintensive betriebliche Sperrpausen aus und erreicht hohe Meßgeschwindigkeiten und Streckenleistungen. Im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahren kann eine 3- bis 4-fache Leistungssteigerung erwartet werden. Durch den modularen Systemaufbau sind eventuellen Erweiterungs- und Ausbaumöglichkeiten keine Grenzen gesetzt.

Radiometrische und geometrische Untersuchung des PhotoScan PS1

Anna Fellhofer

Diplomarbeit: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung TU Wien, 1995. Begutachter: o.Univ.-Prof. Dr. K. Kraus, Betreuer: Dr. R. Ecker.