

Schwellenverhalten und emergente Ordnungsübergänge in komplexen Systemen

Seismologie

Erdbeben gelten als klassisches **Schwellenphänomen** in geologischen Systemen. Tektonische Spannungen bauen sich in der Erdkruste allmählich auf, bis die Scherfestigkeit einer Verwerfung überschritten wird – an diesem **kritischen Schwellenwert** versagt der Reibungswiderstand abrupt und es kommt zum Erdbeben, begleitet von einem plötzlichen Spannungsabfall ¹. Dieser **seismische Zyklus** aus langsamer Spannungsakkumulation und rascher Entspannung nach Überschreiten der Schwelle entspricht einem Ordnungsübergang: Das System verharrt zunächst im metastabilen Zustand (gespannte Verwerfung) und „springt“ dann nichtlinear in einen neuen Ordnungszustand (relaxierte Verwerfung). Die Statistik der Erdbeben folgt dem *Gutenberg-Richter-Gesetz*, das eine **Potenzgesetz-Verteilung** der Ereignismagnituden beschreibt. Typischerweise treten zehnmal mehr Beben der Magnitude 3 als der Magnitude 4 auf, und einhundertmal mehr Magnitude 2 als Magnitude 4 ². Diese skaleninvariante Verteilung wird als Hinweis gedeutet, dass die Erdbebenfolge in einem kritischen Zustand operiert, bei dem vielfältige **Schwellenüberschreitungen** kleinerer und größerer Ausmaße selbstähnlich auftreten (Stichwort *Self-Organized Criticality*). Darüber hinaus können **kleine externe Impulse** als Auslöser dienen, sofern das System nahe am kritischen Punkt ist. So genügen in einem bereits hoch belasteten Störungsgebiet oft geringfügige Änderungen (z.B. minimaler zusätzlicher Druck durch Fluidinjektion oder die vorbeilaufenden seismischen Wellen ferner Beben), um ein größeres Beben zu „triggern“. Untersuchungen zeigen, dass menschliche Eingriffe wie das Füllen von Stauteichen oder tiefe Bohrungen oft nur den sprichwörtlichen **letzten Anstoß** liefern: Ein kleiner Impuls setzt eine lawinenartige Reaktion frei, da der Untergrund ohnehin kurz vor der Instabilität stand ³. So wurde beispielsweise bei mehreren Fällen von Talsperren und Fracking-induzierter Seismizität festgestellt, dass bereits zusätzliche Porendrücke von < 0,1 MPa (etwa 1 bar) ausreichen können, um ein großes Erdbeben auszulösen, wenn die tektonische Spannung nahe am **Versagensschwellenwert** ist ⁴. Diese Beobachtungen unterstreichen das nichtlineare Verhalten: Winzige Ursachen bewirken jenseits der Schwelle eine unverhältnismäßig große Wirkung.

Physik und Chemie

Viele physikalische Systeme zeigen **Phasenübergänge**, bei denen jenseits eines bestimmten Schwellenparameters eine neue Ordnungsphase emergiert. Klassische Beispiele sind **Aggregatzustandsänderungen**: Wird Wasser auf 100 °C erhitzt (bei 1 atm Druck), überschreitet es die Siedeschwelle – es kommt zum Phasenübergang von flüssig zu gasförmig (Verdampfen). Ähnlich führt Unterschreiten des Gefrierpunkts zum plötzlichen Erstarren (flüssig → fest). Solche Übergänge sind mit **Symmetriebrechungen** und neuen Ordnungsmustern verbunden: In der *Landau-Theorie* wird ein Phasenübergang als spontanes Entstehen eines neuen **Ordnungsparameters** beschrieben, der oberhalb der kritischen Temperatur/Druck-Kombination auftritt ⁵. Beispielsweise besitzt ein Kristallgitter unterhalb der Schmelztemperatur eine Fernordnung (Symmetrie des Gitters, nicht vorhanden in der ungeordneten Flüssigphase). Die Entstehung der Ordnung verläuft hier sprunghaft beim Erreichen der **kritischen Schwelle**. – Ein verwandtes Konzept ist die **Perkolation**: Betrachtet man ein Netzwerk, in dem Verbindungen zufällig hinzugefügt werden, so gibt es einen kritischen Perkolationsgrad, ab dem sich ein größter zusammenhängender Cluster quer durch das ganze System

ausbildet. Unterhalb dieser **Perkolationsschwelle** bleiben nur lokale Cluster; oberhalb davon existiert (im Limes eines unendlichen Gitters) mit Wahrscheinlichkeit 1 ein **unendlicher Cluster**, der das System „durchspannt“⁶. Der Übergang beim Erreichen der Perkolationsschwelle ist abrupt und weist Analogien zu Phasenübergängen auf (z.B. lassen sich *kritische Exponenten* definieren, und nahe der Schwelle treten lange Korrelationslängen auf). – Auch **Kristallisierungsvorgänge** verlaufen oft als Schwellenphänomene. Eine Flüssigkeit kann beispielsweise unterkühlt werden, ohne zu erstarren – erst wenn ein **Keim** vorhanden ist oder genügend Übersättigung/Abkühlung erreicht ist, setzt schlagartig die Kristallbildung ein. Die klassische Keimtheorie definiert einen **kritischen Keimradius** bzw. eine Mindest-Übersättigung: Jenseits dieser kritischen Bedingungen wird der Keimwachstum energetisch begünstigt und das System fällt in den geordneten Festkörperzustand⁷. Unterhalb der Schwelle hingegen bleibt das System metastabil in der ursprünglichen Phase. Dieses Verhalten erklärt z.B., warum reines Wasser teils unter 0°C flüssig bleibt, bis durch Erschütterung oder Partikel ein Eiskristallkeim initiiert wird – dann friert das gesamte Volumen nahezu schlagartig.

Superfluides Helium bietet ein eindrucksvolles Beispiel für einen quantenphysikalischen Schwellenübergang. Flüssiges Helium geht bei $T \approx 2{,}17$ K (dem sogenannten *Lambda-Punkt*) in den **superfluiden Zustand** über. Unterhalb dieser kritischen Temperatur emergieren neuartige Ordnungszustände (ein makroskopischer Quantenzustand, beschrieben als Bose-Einstein-Kondensat der Helium-4-Atome). Die Konsequenzen sind **nichtlineare Sprünge** in den Materialeigenschaften: Helium verliert *über Nacht* seine innere Reibung (Viskosität) praktisch vollständig. So kann superfluide Heliumflüssigkeit z.B. durch poröse Membranen oder feinste Ritzen fließen, die normales Helium nicht passieren würde⁸. In dem oben gezeigten Experiment kriecht Helium II als dünner Film an den Gefäßwänden hoch und fließt über den Rand – ein Phänomen (Rollin-Film), das bei höherer Temperatur *nie* auftritt. Erst das Unterschreiten der **Schwellentemperatur** ermöglicht diese emergente „ordnungsgemäße Unordnung“ der Quantenflüssigkeit. – Ein weiteres Schwellenverhalten findet sich bei **perkolativen Übergängen** in zusammengesetzten Materialien: Beispielsweise wird ein Gemisch aus isolierendem Polymer und leitenden Füllstoffpartikeln jenseits einer bestimmten Volumenkonzentration *sprunghaft* elektrisch leitfähig – die leitenden Partikel bilden ab der **Perkolationsgrenze** einen durchgehenden Cluster (Netzwerk)⁶. Darunter bleibt das Material isolierend, obwohl schon viele Partikel enthalten sind. Insgesamt illustrieren diese Beispiele den universellen Charakter von Schwellenübergängen: Sobald ein Kontrollparameter (Temperatur, Konzentration etc.) einen kritischen Wert überschreitet, verändert sich das makroskopische Verhalten des Systems qualitativ – eine neue kollektive Ordnung tritt auf.

Astrophysik

Auch im Kosmos finden sich **kritische Schwellenmechanismen**, die über Stabilität oder dramatische Umbrüche entscheiden. Ein zentrales Beispiel ist die **Sternentstehung** durch gravitativen Kollaps interstellarer Gaswolken. Hier definiert das *Jeans-Kriterium* die **Schwelle zwischen Stabilität und Kollaps**: Eine Gaswolke mit gegebener Temperatur T und Dichte ρ bleibt stabil (im hydrostatischen Gleichgewicht), solange der Gasdruck die eigene Gravitation aufwiegen kann. Wird jedoch die sogenannte *Jeans-Masse* überschritten – d.h. die Wolke ist *zu massereich* (oder ausreichend abgekühlt) für ihren inneren Druck – dann setzt ein **runaway-Kollaps** ein⁹ ¹⁰. Jenseits dieser Schwelle wächst jede kleine Dichtefluktuation durch Selbstanziehung an, anstatt gedämpft zu werden. So entstehen aus anfangs diffusen Nebeln plötzlich dicht konzentrierte Regionen, die Protosterne bilden. In Zahlen liegt die Jeans-Masse z.B. bei einer dichten Molekülwolke im All typischerweise bei einigen Hundert bis tausend Sonnenmassen – kleinere Fragmente (unterkritisch) oszillieren nur, während größere (überkritisch) unstetig in einen Stern zusammenfallen. Das *Jeans-Kriterium* ist also ein **Ordnungsübergang** im interstellaren Medium: kontinuierliches Zuführen von Masse/Energie bleibt folgenlos bis zur Schwelle, doch darüber läuft die Wolke irreversibel in ein neues Organisationsniveau (Stern mit umgebender Akkretionsscheibe) und strahlt überschüssige Bindungsenergie ab. – Einen

noch dramatischeren Schwellenprozess stellt die Explosion von **Supernovae** dar. Hier sind zwei Mechanismen hervorzuheben: Zum einen kollabiert der Kern eines massereichen Sterns am Ende seines Lebens schlagartig, wenn er die **Chandrasekhar-Grenze** (~1,4 Sonnenmassen) überschreitet. In roten Überriesen wächst der eisenreiche Kern durch Kernfusion ständig an, bis der entartete Elektronendruck die Gravitation nicht länger tragen kann – die Kernmaterie stürzt binnen Sekundenbruchteil in sich zusammen (bis zur Neutronenstern-Dichte) und schleudert dabei die äußeren Schichten in einer Supernova-Explosion ab¹¹ ¹². Ähnlich zündet eine **Typ-Ia-Supernova** in einem Weißen Zwerg, wenn dieser durch Akkretion von Materie die ~1,4 \$M_{\odot}\$-Schwelle überschreitet: Jenseits davon wird das entartete Kohlenstoff-Oxygen-Gemisch instabil und verbrennt in einer explosiven thermonuklearen Reaktion – **eine kleine Zunahme der Masse führt hier zum völligen Umkippen des Zustands** (von einem stabilen kompakten Stern zu einem expandierenden Explosionsrest). – Auch die Bildung von Planeten und Galaxien ist an **kritische Akkretionsschwellen** geknüpft. Im Standardmodell der Planetenentstehung (Kern-Akkretionsmodell) muss ein entstehender fester Planetenkern erst eine Mindestmasse erreichen, bevor er rasch Gas aus der Urnebelwolke anziehen kann. Für Gasriesen wird ein **kritischer Kern** von etwa *10 Erdmassen* angegeben – oberhalb dieses Schwellenwerts beginnt eine runaway-Gasakkretion und ein Jupiter-ähnlicher Riese entsteht¹³. Unterhalb dieser Grenze bleibt es bei einem Neptun-ähnlichen Eisplaneten ohne massereiche Hülle. Analog existieren in der Galaxienentstehung *Kühlungs-Schwellen*: Kleine Urhalos unter einer gewissen Masse (Größenordnung $10^{7} - 10^{8} M_{\odot}$) konnten ihr Gas nicht effizient abkühlen und Sterne bilden, während größere Halos genügend Gravitation hatten, um durch *H2- und Atombahnkühlung* Sterne zu zünden. Neuere Forschung weist darauf hin, dass mittels molekularem Wasserstoff bereits Halos ab ~10 Millionen \$M_{\odot}\$ Sterne bilden können – frühere Annahmen lagen bei wesentlich höheren Schwellenmassen¹⁴. Dieses „**Alles-oder-Nichts**“-Verhalten erklärt, warum es „dunkle“ Minihalos ohne Galaxie gibt, während etwas größere Halos zu leuchtenden Zwerggalaxien wurden. Insgesamt zeigt die Astrophysik in unterschiedlichen Skalen, dass kontinuierliche Entwicklungen (Maszezuwachs, Abkühlung) an **kritischen Punkten** abrupt neue Strukturen hervorbringen – von Sternen und Planeten bis hin zu Supernova-Explosionen.

Sprachentwicklung

Die Evolution und Ontogenese der Sprache vollzieht sich nicht linear, sondern scheint ebenfalls **Schwellenübergänge** zu beinhalten, ab denen qualitativ neue Strukturen entstehen. In der frühkindlichen **Sprachentwicklung** ist ein bekanntes Phänomen der *Wortschatzspur*: Ein Kleinkind lernt zunächst langsam Wörter, bis es etwa 50 Wörter aktiv beherrscht – dann plötzlich setzt eine „**Wortexplosion**“ ein¹⁵. Studien zeigen, dass um den **Schwellenwert von ~50 Wörtern** (meist im Alter von ~18–20 Monaten) ein entscheidender Entwicklungsschritt passiert: Das Kind beginnt, Wörter zu kombinieren, und überschreitet damit die *kritische Schwelle* zum **Grammatikerwerb**¹⁶. Die Produktion von Verben, Adjektiven und Funktionswörtern nimmt zu, sobald eine gewisse **kritische Masse** an Vokabeln und Konzepten vorhanden ist – und dies erlaubt dem Gehirn, **syntaxfähige Strukturen** zu bilden (z.B. Zweiwortsätze als Keim der Grammatik). Ist dieser Schwellenwortschatz nicht erreicht, verzögert sich der Grammatikerwerb deutlich; bei *Late Talkers* mit <50 Wörtern zeigen sich häufig anhaltende Sprachentwicklungsstörungen¹⁷. Dieses empirische Ergebnis stützt die Annahme, dass Sprachemergenz ein **nichtlinearer Prozess** ist: Aus ausreichend vielen Einzelementen (Wörtern/Konzepten) emergiert plötzlich ein neues Ordnungsniveau (regelgeleitete Syntax), das vorher nicht angelegt war. – Auch in der evolutionären Entstehung der menschlichen Sprache werden **Schwellenhypothesen** diskutiert. So existiert die Theorie, dass die frühe Homininenkommunikation zunächst primär *gestisch* oder einfach-vokal (Zeichen und einzelne Rufe) war und erst ab einem bestimmten Punkt – möglicherweise getrieben durch wachsende Gruppengrößen und soziale Komplexität – in voll ausgeprägte **Lautsprache mit Syntax** umschlug. Der Anthropologe Robin Dunbar etwa argumentiert, dass Sprache ursprünglich als effizienteres „*vokales Grooming*“ evolvierte, um soziale Bindungen in größeren Gruppen zu pflegen, die rein durch gegenseitiges Körperpflege-Grooming nicht

mehr zusammengehalten werden konnten¹⁸. Bei Primaten besteht ein Zusammenhang zwischen **Gruppengröße** und benötigter sozialer Bindungszeit (Grooming): Affenarten können Gruppen nur bis zu einer Größe X stabil halten, weil darüber hinaus die Zeit zum gegenseitigen Sozialkontakt nicht ausreicht. Dunbar überträgt dies auf frühe Menschen – erst als die Gruppen einen **kritischen Umfang** (er schätzt ~100–150 Individuen) überschritten, brauchte es ein neues „Werkzeug“ (Sprache/Gossip), um Kohäsion und Informationsaustausch effizient aufrecht zu erhalten¹⁸. Sprache wäre demnach an einen **sozialen Schwellenübergang** gekoppelt: Kleine Horden kamen ohne Grammatik aus, während bei Überschreiten einer Populationsgröße komplexe Sprache plötzlich adaptiv wurde und daher sprunghaft entstand (begünstigt auch durch genetische/neurologische Schwelleneffekte, z.B. Mutationen wie FOXP2). – Des Weiteren lassen sich **semantische Schwellen** definieren: Begriffe und Abstrakte entstehen oft erst, nachdem eine Vorstufe genügend Inputs akkumuliert hat. Beispielsweise entwickelt ein Kind das Verständnis bestimmter Konzepte (Zeit, Anzahl, Selbst) meist sprunghaft an einem bestimmten Reifestand, nicht graduell. Ähnliches gilt kulturell: Die Erfindung von Schrift, Symbolsprache oder grammatischen Kategorien in der Menschheitsgeschichte könnten **Emergenzschwellen** überschritten haben, jenseits derer eine neue Ordnung der Informationsverarbeitung möglich wurde. Zusammengefasst deutet vieles darauf hin, dass Sprache (sowohl im individuellen Erwerb als auch in der Evolution) **phasenartig** entsteht – relativ kontinuierliche Zuwächse an kognitivem Input oder sozialer Komplexität führen beim Erreichen kritischer Schwellen zu **neuen Qualitätsstufen** der Kommunikationsfähigkeit.

Klimasysteme

Kippelemente im Erdsystem: Das **Klima** reagiert nicht immer linear auf schlechende Änderungen, sondern kennt sogenannte **Kipp-Punkte** – kritische Schwellen im System, ab denen es zu abrupten, teils irreversiblen Umbrüchen kommt. Abb. 1 oben zeigt einige wichtige Kippelemente: Beispiele sind das Abschmelzen des **Grönlandeisschildes**, das Absterben des **Amazonas-Regenwaldes**, das Abtauen von **Permafrostböden** oder eine mögliche **Störung der thermohalinen Zirkulation** (Golfstrom-System). Solche Regionen oder Prozesse haben *nichtlineare* Antwortkurven: Unterhalb des Kippunktes reagiert das System graduell (z.B. etwas mehr CO₂ führt zu etwas wärmerem Klima), doch beim Erreichen eines **kritischen Schwellenwerts** tritt ein qualitativ neues Regime ein¹⁹. Eine oft bemalte Metapher ist die Tasse auf dem Tisch: Man kann sie langsam Richtung Rand schieben (schrittweise Änderung der Randbedingung), und zunächst passiert nichts Sichtbares – doch sobald der Schwerpunkt über den Rand kommt, **kippt** die Tasse plötzlich vollständig herunter²⁰. Genauso kann z.B. der allmähliche Temperaturanstieg irgendwann dazu führen, dass das **arktische Meereis** im Sommer komplett verschwindet und das System auf einen neuen Zustand (eisfreie Arktis) umklappt. Wichtig ist: **Positive Rückkopplungen** spielen eine zentrale Rolle. Im Klimasystem gibt es viele sich selbst verstärkende Prozesse – etwa die *Eis-Albedo-Rückkopplung*: Weniger Eis führt zu geringerer Rückstrahlung und mehr Aufnahme von Sonnenwärme, was wiederum das Eis weiter abschmilzt. Solange Gegenmechanismen dies kompensieren, bleibt das System stabil, aber wird eine **Schwelle** überschritten, verstärkt sich der Effekt **lawinenartig** selbst. Das Ergebnis sind oft **abrupte Veränderungen**: z.B. könnte ein Kollaps der Atlantikzirkulation innerhalb weniger Jahrzehnte eintreten, obwohl zuvor über Jahrhunderte nur eine schlechende Abschwächung zu messen war. Ein weiteres Merkmal ist die **Irreversibilität** solcher Ordnungsübergänge – einmal gekippt, bleibt der neue Zustand bestehen, selbst wenn man den Auslöser wieder zurückföhrt (Hysterese-Effekt). So würde ein vollständig kollabierter Eisschild selbst bei Abkühlung nicht einfach wieder rasch anwachsen.

Um solche **kritischen Übergänge** besser zu erkennen, erforscht man *Frühwarnindikatoren* im Klimasystem. In komplexen Modellen und Paläodaten zeigen sich typische **Vorboten** beim Annähern an einen Kippunkt. Beispielsweise verlangsamt sich die Rückkehrzeit nach kleinen Störungen – dieses *kritische Verlangsamten* äußert sich in zunehmender **Persistenz zeitlicher Fluktuationen** und wachsender **Varianz** kurz vor dem Übergang²¹. Praktisch könnte man etwa beobachten, dass die

Jahr-zu-Jahr-Schwankungen der AMOC-Strömungsstärke immer länger anhaltende Ausreißer aufweisen oder die Meereseisfläche abnormal stark fluktuiert, was auf den Verlust stabilisierender Rückkopplungen hindeutet. In Klimadaten der Vergangenheit wurden solche Signale identifiziert, z.B. vor dem Ende der Afrikanischen Feuchtperiode (plötzliche Wüstenbildung in der Sahara) – die **räumliche Heterogenität** der Vegetationsbedeckung nahm stark zu, bevor das System umschlug ²¹. Allerdings sind Frühwarnsignale nicht narrensicher; manche Kippunkte können ohne große Vorankündigung überschritten werden. Dennoch versucht die aktuelle Forschung, durch engmaschiges Monitoring (Satellitendaten, Ozeanbojen) und statistische Analyse die **Resilienz** kritischer Subsysteme einzuschätzen. Für die Praxis bedeuten diese Erkenntnisse: Das globale Klima besitzt **empirisch belegte Schwellenverhalten**, die den Systemzustand fundamental neu ordnen können. Schon ein scheinbar kleiner zusätzlicher Impuls (z.B. bestimmte zusätzliche Gigatonnen CO₂) könnte ausreichen, um ein Großsystem (Eisschild, Waldökosystem, Zirkulationsmuster) **unumkehrbar zu verändern** – vergleichbar dem letzten Tropfen, der das Fass zum Überlaufen bringt ²² ²³. Entsprechend groß ist die Bedeutung vorsorglicher Schwellenanalyse: Werden Kippunkte erkannt und eingehalten, bleibt das Klimasystem im stabilen Bereich; werden sie überschritten, *emergieren* neue, für die menschliche Zivilisation potenziell gefährliche Zustände.

Ökologie und Sozialverhalten

In Ökosystemen und sozialen Verbänden von Tieren finden sich **Schwelleneffekte**, die zu emergenten Ordnungsänderungen führen. Ein bekanntes Konzept der Populationsökologie ist der **Allee-Effekt**: Viele Tierpopulationen haben eine **Mindestgröße oder -dichte**, unterhalb derer ihre Wachstumsrate negativ wird, d.h. die Gruppe droht auszusterben. Gründe sind z.B. Schwierigkeiten bei der Partnersuche, zu geringe Kooperation bei der Jungenaufzucht oder fehlende Schwarmvorteile bei Räuberverteidigung. Gibt es weniger Individuen als den kritischen Schwellenwert (die *Allee-Schwelle*), verstärken sich diese Nachteile, was oft in einen Abwärtstrend mündet – die Population kann sich *selbst bei ausreichend Ressourcen* nicht erholen ²⁴. Oberhalb der Schwelle hingegen kehren sich die Effekte um: Größere Gruppen profitieren von Kooperation, finden leichter Partner etc., sodass die Wachstumsrate plötzlich positiv wird. Dieses **Schwellenverhalten der Populationsdynamik** führt z.B. dazu, dass manche Arten überlebensfähig bleiben, solange ein *Minimum von vielleicht 50 Tieren* vorhanden ist, aber aussterben, wenn sie unter diese Zahl fallen (obwohl rein theoretisch noch Nachkommen möglich wären). Management und Artenschutz berücksichtigen solche **kritischen Populationsgrößen** (Stichwort *Mindestvervielfachungszahl*), um ein Abrutschen unter den Erhaltungskipp-Punkt zu verhindern.

Auch im **Sozialverhalten** von Schwarm- und Rudeltieren treten Schwellen auf. Bei **Gruppengrößen** unter einer bestimmten Anzahl kann es sein, dass keine stabile Sozialstruktur ausgebildet wird – ab einer kritischen **Quorum-Größe** hingegen formiert sich plötzlich ein geordneter Verband mit Rollenverteilung. Zum Beispiel zeigen **Wölfe** und **Löwen** erst ab einer gewissen Rudelgröße von einigen Tieren kooperatives Jagdverhalten auf Großbeute; darunter sind sie Einzel- oder Pärchenjäger. Studien an Wölfen belegen, dass der Jagderfolg bei großer Beute (z.B. Bison, Elch) *nicht linear* mit jedem zusätzlichen Rudelmitglied steigt, sondern es einen **Schwellenwert** gibt: Rudel unter dieser Größe scheitern fast immer, während ab Überschreiten der optimalen Teamgröße die Erfolgsrate stark zunimmt ²⁵. Dies liegt daran, dass gewisse kooperative Strategien (Umzingeln, gemeinsames Attackieren) erst funktionieren, wenn *genügend Individuen synchron agieren*. Ähnlich kennt man aus Insektenstaaten **Quorum-Entscheidungen**: Ameisenkolonien etwa wechseln den Neststandort erst, wenn eine kritische Anzahl Späher das neue Nest überzeugt hat – unterschreitet die Summe der zustimmenden Ameisen das interne Quorum, bricht der Umzugsprozess wieder ab; überschreitet sie es, wechselt plötzlich die gesamte Kolonie geschlossen das Nest ²⁶. Solche *Nichtlinearitäten* gewährleisten, dass **kollektive Entscheidungen** nicht voreilig getroffen werden, aber bei ausreichendem Konsens sehr rasch und kohärent ablaufen. – **Emergente soziale Organisation** zeigt

sich auch bei steigender Gruppengröße: Kleine Tiergruppen kennen oft keine komplexe Hierarchie oder Arbeitsteilung. Sobald jedoch eine Kolonie eine Schwelle überschreitet, entstehen **Spezialisierungen und Strukturen**: Etwa bilden Ameisen ab einer bestimmten Koloniestärke verschiedene Kasten (Arbeiter, Soldaten, Königinnen) aus – die Schwarmintelligenz bringt ab diesem Level geordnete Arbeitsteilung hervor, was kleineren Kolonien noch fehlt. Bei höherer **Populationsdichte** von Territorialtieren sieht man zudem das plötzliche Entstehen von Reviergrenzen und Dominanzhierarchien – unterhalb eines Dichte-Schwellenwerts leben die Tiere diffus ohne feste Territorien, doch überschreiten zu viele Individuen einen Raum, setzen sich plötzlich klare Rangordnungen und Gebietsansprüche durch (weil der Konkurrenzdruck einen Ordnungszustand erzwingt). Ein Sonderfall ist der **Allee-Effekt** in sozialen Verbänden: Hier verbessert eine größere Gruppengröße die Überlebensfähigkeit *so stark*, dass es zu *Kooperationsverstärkung* kommt – z.B. bei **Rudelbildung** der Afrikanischen Wildhunde oder **Schwarmverhalten** von Fischen. Unter einer kritischen Schwarmgröße verlieren Fische den Zusammenhalt und können leichter von Räubern gefressen werden; ab einer gewissen Anzahl aber stabilisiert sich das Schwarmverhalten, und der Schutz durch das Kollektiv greift voll. Solche Beobachtungen untermauern die Idee, dass **Ordnung in der Biologie oft emergent ab einer Schwelle** entsteht: Die **Qualität des Verhaltens** (z.B. effizient jagen, Territorien halten, kooperativ brüten) ändert sich sprunghaft, wenn eine Gruppe *quantitativ* eine bestimmte Größe oder Dichte erreicht. Dies lässt sich in übergreifenden Schwellenfeld-Modellen $\psi + \varphi$ abstrahieren, welche die universellen Muster – von Erdbeben über Phasenübergänge bis zu sozialen Kippdynamiken – gemeinsam beschreiben: *Das Unterschreiten oder Überschreiten kritischer Schwellen aktiviert neue kollektive Ordnungen in komplexen Systemen.*

19 18

Quellen: Gutenberg & Richter (1944); Bak et al. (1988); Scheffer et al. (2009); Lenton et al. (2008); Rahmstorf et al. (2019); Dunbar (1996) et al. (Details und vollständige Referenzen siehe verknüpfte Quellenangaben)

1 Seismological criticality concept and percolation model of fracture | Geophysical Journal International | Oxford Academic

<https://academic.oup.com/gji/article/164/1/125/631593>

2 Von kleinen auf große Erdbeben schließen: das Gutenberg-Richter-Gesetz - ESKP

<https://www.eskp.de/grundlagen/naturgefahren/von-kleinen-auf-grosse-erdbeben-schliessen-das-gutenberg-richter-gesetz-9351031/>

3 4 Anthropogenic Triggering of Large Earthquakes | Scientific Reports

https://www.nature.com/articles/srep06100?error=cookies_not_supported&code=e549e695-2ebd-4e50-ba39-e553b3cbf548

5 Phasenübergang – Wikipedia

<https://de.wikipedia.org/wiki/Phasen%C3%BCbergang>

6 Perkolationstheorie - Lexikon der Physik

<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/perkolationstheorie/11050>

7 Keimbildung – Wikipedia

<https://de.wikipedia.org/wiki/Keimbildung>

8 Suprafluidität | LEIFIphysik

<https://www.leifiphysik.de/waermelehre/temperatur-und-teilchenmodell/ausblick/suprafluiditaet>

9 10 Jeans instability - Wikipedia

https://en.wikipedia.org/wiki/Jeans_instability

11 Chandra Peers Into A Supernova's Troubled Heart - Universe Today

<https://www.universetoday.com/articles/chandra-peers-into-a-supernovas-troubled-heart>

- 12** Chandrasekhar limit - Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Chandrasekhar_limit
- 13** [1311.0011] On the Minimum Core Mass for Giant Planet Formation at Wide Separations
<https://arxiv.org/abs/1311.0011>
- 14** Do "Completely Dark" Dark Matter Halos Exist?
<https://today.ucsd.edu/story/dark-dark-matter-halos>
- 15** **16** **17** Grimm – Spezifische Sprachentwicklungsstörungen – Foerderplanet.de
<https://heikoseiffert.wordpress.com/sprachheilpadagogik/grimm-spezifische-sprachentwicklungsstorungen/>
- 18** Grooming, Gossip, and the Evolution of Language | Summary, Quotes, FAQ, Audio
<https://sobrief.com/books/grooming-gossip-and-the-evolution-of-language>
- 19** **20** pik-potsdam.de
<https://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Kipppunkte%20im%20Klimasystem%20-%20Update%202019.pdf>
- 21** Max-Planck-Institut für Meteorologie: Abrupte Veränderungen in der Vergangenheit liefern Hinweise auf kaskadenartig reagierende Kipppunkte und "Frühwarnsignale" im Erdsystem
<https://mpimet.mpg.de/kommunikation/detailansicht-news/abrupte-veraenderungen-in-der-vergangenheit-liefern-hinweise-auf-kaskadenartig-reagierende-kipppunkte-und-fruehwarnsignale-im-erdsystem>
- 22** **23** Kipppunkte im Klimasystem – Klimawandel
https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Kipppunkte_im_Klimasystem
- 24** Allee effects and extinction in a lattice model - ScienceDirect.com
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040580907000780>
- 25** [PDF] Differential wolf-pack-size persistence and the role of risk when ...
<https://wolf.org/wp-content/uploads/2013/08/355.Differential-wolf-pack-size-persistence-and-the-role-of-risk-when-hunting-dangerous-prey.pdf>
- 26** How ants use quorum sensing to estimate the average quality of a ...
<https://www.nature.com/articles/srep11890>