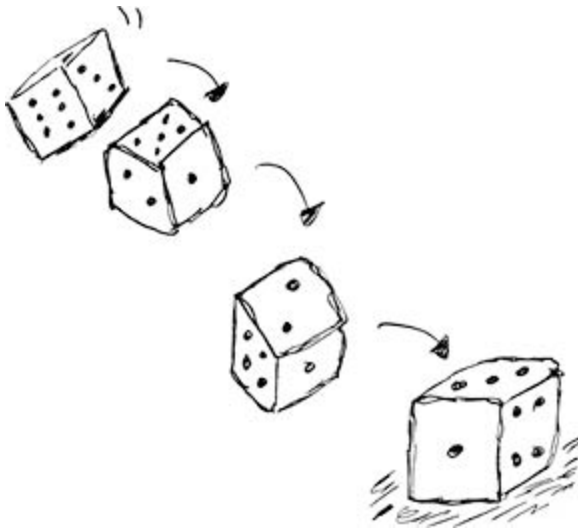
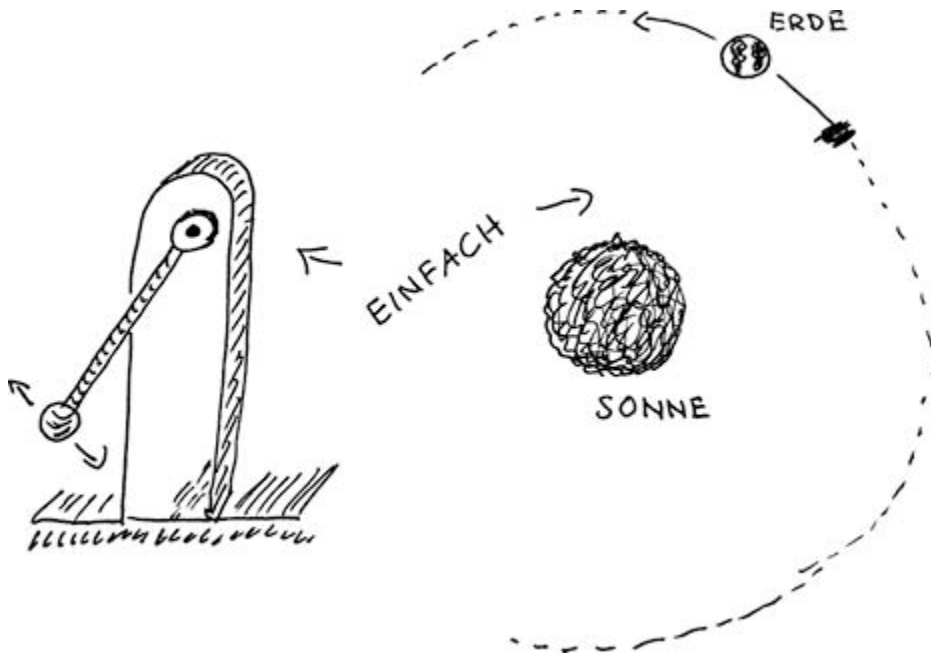


Am besten versteht man komplexe Systeme, wenn man sich zunächst (aber nur ganz kurz) mit Dingen beschäftigt, die nicht komplex sind. Das einfache Pendel einer Wanduhr zum Beispiel. Das Uhrpendel ist nicht komplex. Es bewegt sich gleichmäßig, ist berechenbar, vorhersagbar, etwas langweilig, und kompliziert ist es schon gar nicht. Einfache Pendel werden bei der Hypnose eingesetzt, damit sich das Bewusstsein quasi freiwillig und aus Langeweile abmeldet. Ganz ähnlich, und mathematisch nicht unverwandt, ist die Bewegung der Erde um die Sonne. Jedes Jahr zieht die Erde (näherungsweise) eine Kreisbahn um die Sonne, die Bewegung wiederholt sich alle 365,25 Tage. Ganz einfach, immer im Kreis.



Der Spielwürfel ist einfach und komplex.

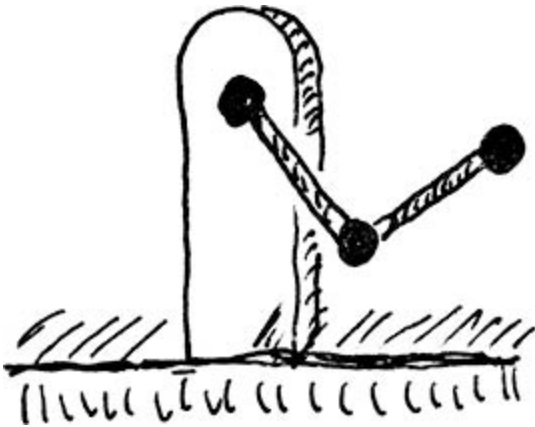
Gibt man dem Pendel allerdings ein zweites Gelenk, sieht die Sache ganz anders aus. Aus dem simplen Pendel ist ein komplexes Doppelpendel geworden. Ähnlich wie beim Würfel sind die Bewegungen des Doppelpendels reichhaltig an Struktur und Schönheit, obwohl der Unterschied zum einfachen Pendel nur ein weiteres Gelenk ist. Sie glauben das nicht? Suchen Sie im Internet nach Videos von Doppelpendeln. Man wird schnell fündig. Auch das Doppelpendel folgt den simplen Gesetzmäßigkeiten der Newton'schen Mechanik und der Gravitationskraft, und dennoch macht es wilde Dinge: Es bewegt sich scheinbar völlig unvorhersagbar, mal überschlägt es sich, mal nicht, die Bewegung scheint zufällig.



Einfaches. Das Pendel und die Erdbewegung um die Sonne.

Das Doppelpendel repräsentiert eine Klasse von komplexen Systemen, die unerwartet komplizierte Strukturen, Eigenschaften oder Dynamik aufweisen, obwohl ihnen ganz einfache Regeln zugrunde liegen. Man könnte ja erwarten, dass für kompliziertes Verhalten auch komplizierte Mechanismen notwendig sind. Das Doppelpendel zeigt ein Verhalten, das sich deterministisches Chaos nennt. Chaotische Systeme wie das Doppelpendel folgen genauen mathematischen Gesetzmäßigkeiten, die es eigentlich erlauben müssten, aus der Kenntnis des Zustands des Systems in der Gegenwart jeden Zustand in Zukunft zu berechnen. So wie wir sehr genau die Bewegung der Planeten praktisch beliebig lang in die Zukunft vorherberechnen können und zum Beispiel genau wissen, wann die nächsten Mond- und Sonnenfinsternis-Ereignisse stattfinden. Für die nächsten 10000 Jahre oder länger. Im Prinzip müsste das bei dem Doppelpendel auch gehen, denn die Bewegungsgleichungen sind ja bekannt. Das Problem ist aber: Um den Zustand eines Systems in der Zukunft praktisch vorherzusagen, muss man den Zustand in der Gegenwart kennen, also genau messen können. Bei den Messungen gibt es aber immer Messfehler, die zwar durch immer bessere Messmethoden verringert werden können, aber niemals ganz verschwinden. Nun könnte man meinen, dass ein kleiner Messfehler in der Bestimmung des Anfangszustands auch zu einer kleinen Abweichung in der Vorhersage des zukünftigen Zustands führt. In nicht-chaotischen Systemen, wie bei den Planetenbewegungen oder dem einfachen Pendel, ist das auch so. Wenn ich bei einem einfachen Pendel, sagen wir, einen Messfehler von einem Grad im Pendelwinkel

habe, wird meine Vorhersage des Zustands in der Zukunft auch nur etwa einen Grad Abweichung haben. Und hier kommt die Eigenschaft des deterministischen Chaos ins Spiel. Fehler in der Genauigkeit der Messung des Anfangszustands wachsen, sodass man nur kurze Zeit später mit seiner Vorhersage falschliegt. Immer, prinzipiell und fundamental. Ein anschauliches Beispiel aus dem Alltag ist das Billardspiel. Am Anfang werden die 15 Kugeln des Spiels in einer Dreiecksformation auf dem Billardtisch platziert. Bei der Spieleröffnung wird die weiße Kugel mit Wucht auf die Dreiecksformation gestoßen. Leichte Abweichungen in der Ausrichtung der Stoßkugel führen zu völlig anderen Verläufen der getroffenen Kugeln, obwohl die Bewegungsmechanik der Kugeln, wenn sie aufeinanderstoßen, einfachen Kollisionsgesetzen folgt.



Das Doppelpendel. Sieht einfach aus, ist sehr komplex.

Deterministisches Chaos ist in der Natur die Regel und nicht die Ausnahme. Ein anderes Beispiel ist die Wettervorhersage. Die Gleichungen und die Physik, die das Wetter bestimmen, sind bekannt. Aber die Physik des Wetters ist eben chaotisch, und wir können das Wetter nicht drei Monate in die Zukunft berechnen. Es gibt sehr viele Systeme in der Natur, die man selbst dann nicht genau vorhersagen kann, wenn man die Gesetzmäßigkeiten der Bewegung kennt. Das ist etwas enttäuschend, aber auch schön. Letztendlich wird ja alles, was wir sehen, durch recht überschaubare und strukturell einfache fundamentale physikalische Gesetzmäßigkeiten bestimmt. Dennoch ist die Welt voller Komplexität und Unvorhersagbarkeit. Eine fundamentale Ursache hierfür liegt in den Eigenschaften des deterministischen Chaos.

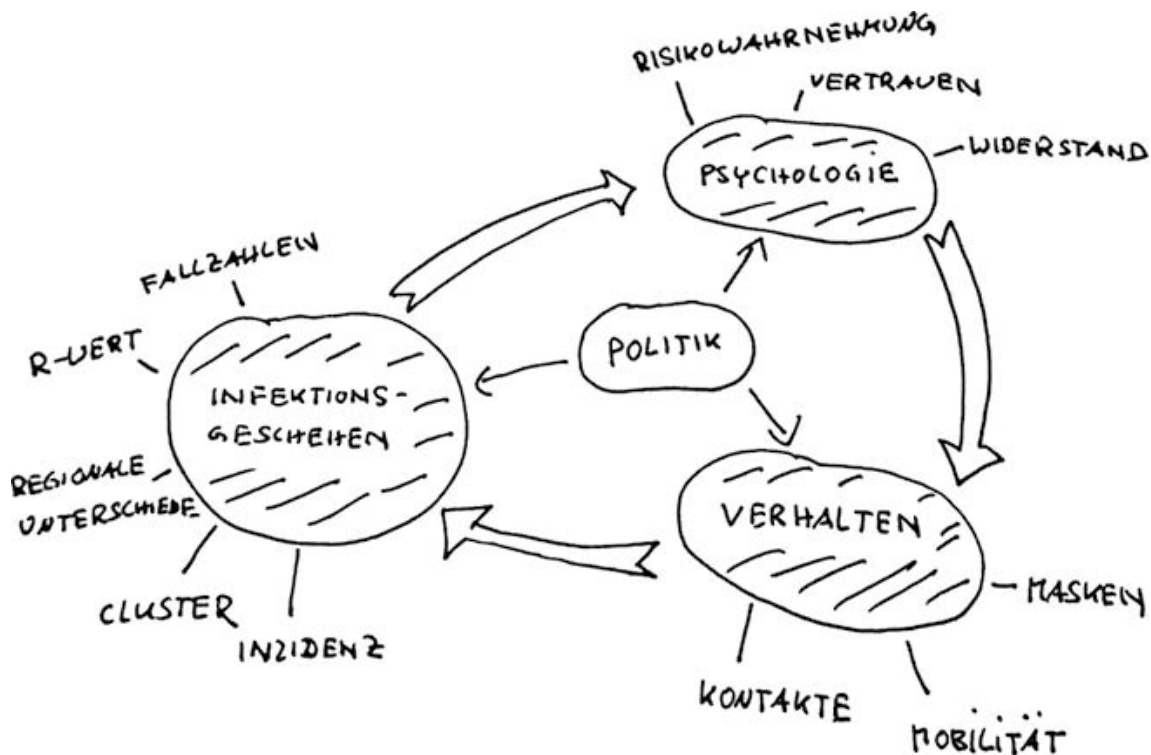
Es geht aber auch andersherum: Sehr komplizierte Systeme zeigen oft einfaches Verhalten, was aber in der Komplexität des Systems nicht unmittelbar erkennbar ist. In der Komplexitätswissenschaft verwendet man den Begriff »Emergenz«, wenn also ohne oberflächlich ersichtlichen Grund aus einem komplizierten Durcheinander eine

Ordnung oder Struktur erwächst. Wer schon einmal im Herbst einem großen Schwarm von Staren im Flug zugesehen hat, weiß, welche Magie davon ausgeht. Schwarmverhalten werden wir (auch bei Menschen) noch genauer unter die Lupe nehmen. Bei einem Vogelschwarm, aber auch bei einer La-Ola-Welle im Stadion, bei Phantomstaus auf der Autobahn oder bei der Meinungsbildung in sozialen Netzwerken interagieren viele und in sich schon komplizierte autonome Elemente (einzelne Stare bzw. Fußballfans, Autofahrerinnen und Facebook-Nutzer), die selbstständig Entscheidungen treffen und alle etwas anders auf äußere Einflüsse reagieren. Dennoch kann sich aus solchen Systemen sogenanntes emergentes Verhalten, ein Schwarmverhalten, entwickeln, dessen Struktur man nicht aus dem Studium der Einzelelemente ableiten kann. Auch solche Systeme sind komplex: Viele, individuell unterschiedliche Elemente wirken nach oftmals nicht leicht ersichtlichen Regeln zusammen, sodass unerwartetes kollektives Verhalten entsteht. Ganz typisch ist auch, dass sich die Strukturen oder die Dynamik von selbst ergeben, ohne Instanz also, die das Ganze lenkt und leitet. Komplexe Systeme sind häufig selbst-organisiert. Es gibt keine Leader, keine Dirigenten. Phantomstaus entwickeln sich von selbst.

Auch bei einer Pandemie sind solche Abläufe zu beobachten. Wir erinnern uns: Ende 2019 tauchte in China das neue Coronavirus SARS-CoV-2 auf. Binnen einiger Wochen breitete es sich weltweit aus. Es wird von Mensch zu Mensch übertragen, Reisende bringen es von Ort zu Ort. Die erste Welle nahm Anfang März 2020 in Deutschland Fahrt auf, erreichte einen Höchstwert von etwa 6000 Neuinfektionen pro Tag im April, die Lage war ernst. Der Bevölkerung wurde klar, dass hier etwas Neues, Gefährliches geschah. Es wurde diskutiert, ob das Tragen von Masken etwas nützen könnte, Lockdown-Maßnahmen wurden entwickelt und politisch durchgesetzt. Die erste Welle wurde gebrochen, die Fallzahlen sanken und blieben den gesamten Sommer auf niedrigem Niveau. Dann folgte die zweite Welle und fiel, wie in so vielen anderen europäischen Ländern, viel stärker aus als die erste. Von Anfang an kamen verschiedene Experten zu Wort. Christian Drosten und Sandra Ciesek haben mit ihrem Podcast die Nation an die Hand genommen und durch die Pandemie geführt. Dank ihres Fachwissens und insbesondere ihrer Offenheit gegenüber wissenschaftlichen Studien außerhalb ihres eigenen Fachgebiets gelang es beiden, die Menschen verständlich zu informieren und ihnen ein unverzerrtes Bild der Realität zu vermitteln. Diese Arbeit war von ungeheurer Wichtigkeit. In erster Linie wurden in der Anfangszeit der Pandemie Virologinnen und Virologen konsultiert, es handelte sich schließlich um ein neues Virus. Es musste klassifiziert, das Genom sequenziert werden, die Übertragungswege mussten identifiziert und die klinischen Verläufe untersucht werden. Die Expertise von

Epidemiologen und Epidemiologinnen war ebenfalls gefragt. Das Robert Koch-Institut rückte in den Fokus der Medien und informierte über Fallzahlen und Inzidenz.

Die Modellierer, oftmals Physikerinnen oder Informatiker, entwickelten Prognosen, analysierten Daten und erklärten die Fallzahlen. Die deutschlandweite Mobilität wurde vermessen, die Corona-Warn-App entwickelt, um die digitale Kontaktrückverfolgung zu erleichtern. Experten und Expertinnen diskutierten menschliche Kontaktnetzwerke, »Superspreader« wurde ein Schlagwort, und Psychologinnen und Verhaltensforscher untersuchten neue Phänomene wie Pandemiemüdigkeit und die Bereitschaft, sich gegen COVID-19 impfen zu lassen. Neben der Pandemie breiteten sich Verschwörungserzählungen aus, einige Menschen trugen Helme aus Alufolie, Neonazis marschierten mit esoterisch angehauchten Aktivisten im Gleichschritt. Als Gesamtsystem betrachtet, ist eine Pandemie ein hochkomplexes, vernetztes, dynamisches, biologisches, gesellschaftliches, soziales, ökonomisches Phänomen. Unsere Kontakte, unser Sozialverhalten, unsere Mobilität haben das Infektionsgeschehen bestimmt. Alles in allem kamen unzählige Faktoren zusammen, die am Ende als Geflecht bewirkt haben, wie die Pandemie sich regional, national und weltweit entfaltete.



Die COVID-19-Pandemie. Ein komplexes dynamisches Phänomen.