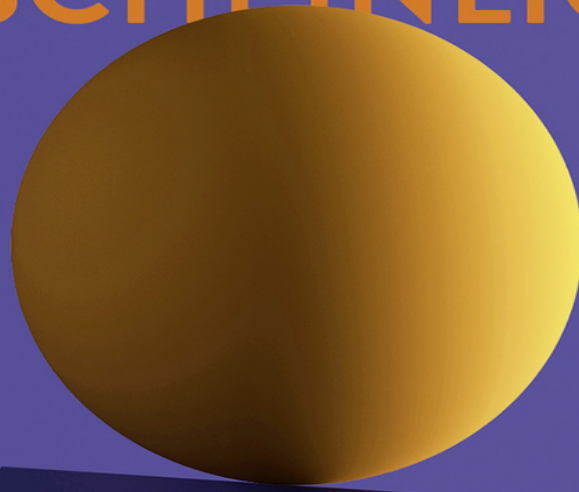


IAN STEWART

**WETTER, VIREN UND
WAHRSCHEINLICHKEIT**



WIE WIR
DIE UNGEWISSHEITEN
DES LEBENS
BERECHENBAR MACHEN

ROWOHLT



Ian Stewart

Wetter, Viren und Wahrscheinlichkeit

Wie wir die Ungewissheiten des Lebens
berechenbar machen

Aus dem Englischen von Monika Niehaus und Bernd Schuh

Über dieses Buch

Wir leben in unsicheren Zeiten, manches scheint gerade ungewiss – Corona und das Klima etwa. Wir möchten unsere Zukunft gerne kennen, statt den Ereignissen einfach ausgesetzt zu sein: ob es um das Wetter geht, die Börsenkurse, unsere Chancen vor Gericht oder beim Lotto, das Geschlecht unseres Kindes, die Berechnung einer Herdenimpfung. Und man kann das tatsächlich näherungsweise herausfinden. Wie – das zeigt uns der britische Kult-Mathematiker Ian Stewart in diesem Buch. Wie machen wir aus Nichtwissen Wissen? Wie bekommen wir mehr Sicherheit, welche unserer Entscheidungen die Beste ist? Wenn es darum geht, das scheinbar Zufällige zu beherrschen, haben wir es mit den Mitteln der Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung weit gebracht. Heute können wir vielfältige Formen von Unwissen bis zu einem gewissen Grad mess- und handhabbar machen.

Allerdings, das zeigt Ian Stewart auch, haben wir in unserem Jahrhundert währenden Bemühen, uns mit dem Unbekannten bekannt zu machen, immer auch neue Ungewissheiten entdeckt. Und oft genug gab es dabei fatale Fehltritte. Man muss also schon wissen, wie es geht. Ian Stewart führt es uns gewohnt kurzweilig und mit leichter Hand vor.

Vita

Ian Stewart, geboren 1945, ist der beliebteste Mathematik-Professor Großbritanniens. Seit Jahrzehnten bemüht er sich erfolgreich, seine Wissenschaft zu popularisieren. Er studierte Mathematik in Cambridge und promovierte an der Universität Warwick. Dort ist er heute Professor für Mathematik und Direktor des Mathematics Awareness Center. Seit 2001 ist Stewart zudem Mitglied der Royal Society. Er lebt mit seiner Familie in Coventry.

Monika Niehaus, Diplom in Biologie, Promotion in Neuro- und Sinnesphysiologie, freiberuflich als Autorin (SF, Krimi, Sachbücher), Journalistin und naturwissenschaftliche Übersetzerin (englisch/französisch) tätig. Mag Katzen, kocht und isst gern in geselliger Runde.

Bernd Schuh, geboren 1948 ist Physiker, Dozent, Journalist, Autor und Übersetzer. Er studierte Mathematik, Physik und Chemie in Köln, wurde 1977 promoviert und habilitierte sich 1982 in Physik. Er ist Träger des Georg von Holtzbrinck Preises für Wissenschaftsjournalismus.

Die Mathematik zu COVID-19 – ein Vorwort

Die ursprüngliche englische Ausgabe von *Wetter, Viren und Wahrscheinlichkeit (Do Dice Play God?)* erschien vor Beginn der COVID-19-Pandemie; darum wurde dieses aktuelle und wichtige Beispiel für Ungewissheit und ihre Berechnung auf globaler Ebene nicht erwähnt – ich hole das in diesem Vorwort nach, das während der Pandemie selbst verfasst wurde.

Die Pandemie illustriert sehr deutlich einige Schlüsselemente, die den heutigen Umgang mit Ungewissheit kennzeichnen. Zunächst sollte man anführen, dass das Ausmaß, in dem ein solches Ereignis «vorhersehbar» ist, davon abhängt, was man vorhersagen will. Die Ärzteschaft und die wichtigsten internationalen medizinischen Institutionen wie die Weltgesundheitsorganisation (WHO) haben seit Jahren gewarnt, eine große und globale Pandemie sei unausweichlich und dass Regierungen in aller Welt sich darauf vorbereiten sollten. Die Logik dahinter ist leicht nachvollziehbar. Ständig entwickeln sich neue Viren. Störungen der natürlichen Umwelt, die in großem Maßstab stattfinden, können dazu führen, dass einige Viren von Tieren auf Menschen überspringen, und das geschieht dann auch. Durch den weltweiten Reiseverkehr, vor

allem den Flugverkehr, kann sich eine neue Infektionskrankheit innerhalb weniger Wochen über den ganzen Globus verbreiten. Unser Lebensstil schafft ideale Bedingungen für die Entwicklung und die weltweite Verbreitung neuer Krankheitserreger.

Niemand indessen konnte vorhersagen, *wann* eine Pandemie ausbrechen würde und *welche* Form sie annehmen würde. Viele Regierungen erstellten Pläne, um mit einer Influenza-Pandemie fertigzuwerden; nur wenige zogen die Möglichkeit einer Coronavirus-Pandemie in Betracht, obgleich die WHO ausdrücklich vor einer solchen Möglichkeit gewarnt hatte.

Der nächste Punkt ist, dass wir inzwischen über Instrumente zur Untersuchung und Bekämpfung von Epidemien und Pandemien verfügen. Viele dieser Werkzeuge verdanken wir Fortschritten in Biologie, Medizin und Ingenieurwissenschaften; die erstaunlich rasche Entwicklung und Herstellung von Impfstoffen gegen COVID-19 ist ein gutes Beispiel dafür. Da es in diesem Buch um Mathematik geht, will ich mich auf eine Auswahl der mathematischen Instrumente beschränken, die uns inzwischen zur Verfügung stehen.

Die Auswirkungen einer Infektionskrankheit hängen von vielen Faktoren ab: wie ansteckend sie ist, wie lange die Inkubationszeit dauert, ob schon offensichtliche Symptome auftreten, bevor die Erkrankung ansteckend wird oder erst danach, und wie stark sie die menschliche Gesundheit gefährdet. Keines dieser Merkmale ist in dem Sinne vorhersagbar, dass wir es im Vorhinein bestimmen können.

Aber sobald sich die Krankheit manifestiert und wir immer mehr Informationen erhalten, kann die medizinische Gemeinschaft wissenschaftliche Methoden einsetzen, um sie besser zu verstehen, und mathematische Methoden verwenden, um zu prognostizieren, wo und wann die Krankheit sich ausbreiten wird. Auch wenn solche Prognosen nicht perfekt sind, so sind sie doch ausreichend präzise, um der Politik als Leitfaden zu dienen, und die Bandbreite wahrscheinlicher Fehler lässt sich einschätzen.

Dazu werden verschiedene mathematische Methoden eingesetzt. Mithilfe der Statistik lässt sich die Wahrscheinlichkeit abschätzen, mit der sich Menschen anstecken oder an der Infektion sterben; ebenso, in welcher Weise bestimmte Interventionen die Ausbreitung der Krankheit beeinflussen. Die medizinische Statistik ist heutzutage hoch entwickelt: Siehe dazu auch Kapitel 12.

Ein weiterer Ansatz ist die *Modellierung*, bei der Wissenschaftler ein «mathematisches Modell» entwickeln. In diesem Zusammenhang meint der Begriff «Modell» nicht irgendetwas, das man aus Kunststoffteilen baut, zum Beispiel ein Modellflugzeug. Vielmehr bezieht er sich auf ein mathematisches System, das Schlüsselemente der Infektion enthält, gewöhnlich als ein System von Gleichungen. Diese Gleichungen fassen grundlegende Merkmale der Krankheit zusammen, und die Lösungen der Gleichungen lassen uns verstehen, wie sich die Krankheit entwickelt und ausbreitet. Bis zu einem gewissen Grad erlauben uns diese Lösungen auch

Vorhersagen, wie dies geschieht und welche Auswirkungen verschiedene Strategien (wie das Tragen von Masken oder Impfungen) vermutlich haben werden.

Mit modernen Computern ist es relativ einfach, die betreffenden Gleichungen zu lösen, es sei denn, das Modell ist extrem komplex. Der schwierige Schritt besteht darin, Modelle zu entwickeln, die so einfach sind, dass sie sich berechnen lassen, aber dennoch so realistisch bleiben, dass sie die Wirklichkeit recht präzise abbilden. Albert Einstein wird der Satz zugeschrieben, man sollte die Dinge so einfach wie möglich ausdrücken, *aber nicht einfacher*. Es ist die alte Zwickmühle mit der Landkarte und dem Gelände. Wenn die Karte zu simpel ist, bildet sie die Realität nicht ab, doch wenn sie allzu komplex ist, wird sie nutzlos. Wenn die Karte identisch mit dem Gelände ist, stellt sie ein perfektes Modell dar, aber dann braucht man sie nicht. Irgendwo in der Mitte findet sich der ideale Punkt, an dem die Karte einfängt, was für den beabsichtigten Zweck wichtig ist, ohne die Dinge durch Hinzunahme unwichtiger Faktoren allzu sehr zu komplizieren.

Solche Modelle zu entwickeln, erfordert viel Erfahrung, Fachwissen und eine ganze Menge an Versuch und Irrtum. Nichtmathematiker lassen sich zudem nur allzu leicht von der Komplexität des Modells und all den seltsamen Symbolen beeindrucken, in denen es sich ausdrückt, während sie sich doch darauf konzentrieren sollten, ob es einigermaßen präzise Vorhersagen über das erlaubt, was man wissen möchte.

Mathematische Modelle der Ausbreitung einer Krankheit lassen sich in zwei Haupttypen unterteilen. Ich will mit «klassischen» epidemiologischen Modellen beginnen. Sie arbeiten mit Quantitäten, die über die gesamte Population einer Stadt oder eines Landes gemittelt werden und faktisch davon ausgehen, dass jedermann in etwa demselben Infektionsniveau ausgesetzt ist und in etwa dasselbe Infektionsrisiko trägt. Hier kommt der häufig verwendete «R-Wert» – die mittlere Infektionsrate – ins Spiel. Weitere mathematische Fachbegriffe werden ebenso häufig verwendet, aber nicht immer erklärt; daher will ich versuchen, einen kurzen Überblick über die wichtigsten Begriffe zu geben, auf die Sie vielleicht schon gestoßen sind.

In der Frühphase einer Epidemie, wenn sich die Krankheit in einer Bevölkerung ohne angeborene Immunität ausbreitet, wächst die Zahl der Infizierten «exponentiell». Das heißt, dass sich die Zahl der Infizierten im Verlauf einer festgelegten Zeitspanne um einen konstanten Betrag vervielfacht. Beispielsweise kann sie sich jede Woche verdoppeln oder alle drei Tage mit 1,1 multipliziert werden. Exponentielles Wachstum finden die meisten von uns nicht intuitiv eingängig, denn es fängt langsam an und scheint zunächst keine große Gefahr darzustellen, um dann plötzlich geradewegs zu explodieren. Eine alte Legende, die aus dem Jahr 1256 n.Chr., wenn nicht gar aus noch früherer Zeit stammt, veranschaulicht dies. Der Erfinder des Schachspiels wird vom König aufgefordert, sich eine Belohnung zu wünschen. Er bittet um

ein Reiskorn auf dem ersten Schachfeld, zwei Reiskörner auf dem zweiten, vier auf dem dritten und so weiter, also jedes Mal eine Verdopplung, bis alle Felder belegt sind. Der König lacht: nur ein paar Körner auf jedem Feld! Schließlich kommen nach dem sechsten Feld erst 63 Körner zusammen! Dann rechnet sein Schatzmeister ein wenig genauer nach und stellt fest, dass die Gesamtmenge an Reis all das, was das Land produzieren kann, weit übersteigt. Am Ende würden sich auf dem Schachbrett 18446744073709551615 Reiskörner türmen. Mit modernen Anbaumethoden würde es mehr als tausend Jahre dauern und den ganzen Planeten brauchen, um so viel Reis zu produzieren.

Ähnlich gibt es ein weitverbreitetes Partyspiel, bei dem ein großes Blatt Papier, zum Beispiel ein Zeitungsblatt, wiederholt auf die Hälfte gefaltet wird. Hier verdoppelt sich die Dicke mit jedem Falten. Anfangs geht das leicht, doch bald erreicht die Dicke einige Millimeter. Zugleich halbiert sich die Papierfläche mit jedem Mal weiter. Bald hält man eine kleine, dicke Masse Papier in der Hand, die zu steif ist, um sie weiterzufalten. In der Praxis sind in der Regel sieben Faltungen alles, was man schafft.

Etwa so verhält es sich bei COVID-19 – anfangs jedenfalls. Der berühmte R-Wert gibt an, wie viele weitere Menschen ein Infizierter im Mittel ansteckt. Beim ursprünglichen Virenstamm blieben Infizierte rund 8–9 Tage lang ansteckend; um die Dinge zu vereinfachen, sagen wir eine Woche. Angenommen, der R-Wert beträgt 1,1. Nach einer Woche hat

jeder Infizierte im Durchschnitt 1,1 neue Infektionen verursacht. Eine Woche später beträgt die Zahl $1,1 \times 1,1 = 1,21$ – immer noch wenig. In den folgenden Wochen wächst diese Zahl auf 1,33, dann 1,46, dann 1,61. Nach acht Wochen liegt die Zahl knapp über 2. Noch immer scheint alles unter Kontrolle. Aber beachten Sie: Nun sind wir an derselben Stelle wie bei der Legende von dem Schachspiel und den Reiskörnern, denn die Zahl verdoppelt sich alle acht Wochen. Ist der R-Wert größer, steigen die Zahlen rascher an, und das Wachstum beschleunigt sich. Ist er kleiner, dauert es länger. Ist R gleich 1, bleibt die Zahl der Infizierten konstant; ist R kleiner als 1, sinkt sie.

Zu Beginn der COVID-19-Pandemie erlaubte die britische Regierung Passagieren aus Ländern, in denen es bereits viele COVID-19-Fälle gab, ohne Gesundheitscheck nach Großbritannien einzufliegen. Das führte offenbar zu mehr als 270 Infektionsquellen, verteilt über ganz Großbritannien. Eine Landkarte hätte 270 winzige Punkte in einer Bevölkerung von 66 Millionen Menschen gezeigt. Das sieht harmlos aus. Eine Zeitrafferkarte dessen, was dann passierte, würde jedoch zeigen, dass jeder kleine Punkt einen weiteren Punkt erzeugte, dann vier, dann acht Punkte ... nach zehn Verdopplungen wären es mehr als tausend, dann zweitausend, viertausend ... nach zwanzig Verdopplungen hätte jedes ursprünglich infizierte Individuum eine Million Menschen infiziert, insgesamt rund das Vierfache der Einwohnerzahl Großbritanniens.

Ganz so war es nicht: Ich habe mit vereinfachten Zahlen gearbeitet, um das Prinzip zu verdeutlichen. Das Ergebnis war jedoch sehr ähnlich. Zunächst sieht es so aus, als sei alles unter Kontrolle, aber dann geht diese vermeintliche Kontrolle rasch verloren, und das Ganze wächst sich zu einem riesigen Problem aus. In Großbritannien wurden aus diesen einzelnen Punkten kleine Flecken, die immer weiter und immer schneller wuchsen, bis die ganze britische Landkarte mit Millionen Punkten übersät war. Wenn man eine große Krise heraufbeschwören will, sollte man ein paar Hundert Infizierte zufällig über das Land verstreuen und keinen Versuch unternehmen, die Ausbreitung der Infektion zu kontrollieren oder Leute zu testen, um herauszufinden, wer sich angesteckt hat. Eine Weile lang scheint alles in Ordnung zu sein, doch dann beginnt die Krankheit plötzlich, überall zu wüten.

Dieselben Berechnungen illustrieren einen weiteren Schlüsselpunkt. Wenn man anfangs beherzt eingreift, um die Anzahl der Infektionen zu reduzieren, denkt man vielleicht, dies mache kaum einen Unterschied. Statt 270 Infektionsquellen hat man dann, sagen wir, nur noch 90. Aber wenn man mit einem Drittel Infektionsquellen startet, sind auch alle Folgezahlen nur ein Drittel so hoch. Statt einer Million Infizierter hat man nur rund 330000. Wenn man zu Beginn ein paar Wochen gewinnt, spart man dieselbe Anzahl an Wochen am Ende, wenn sich die Infektion explosionsartig ausbreitet. So bleibt mehr Zeit, die Krankheit zu verstehen und effektiv zu kontrollieren.

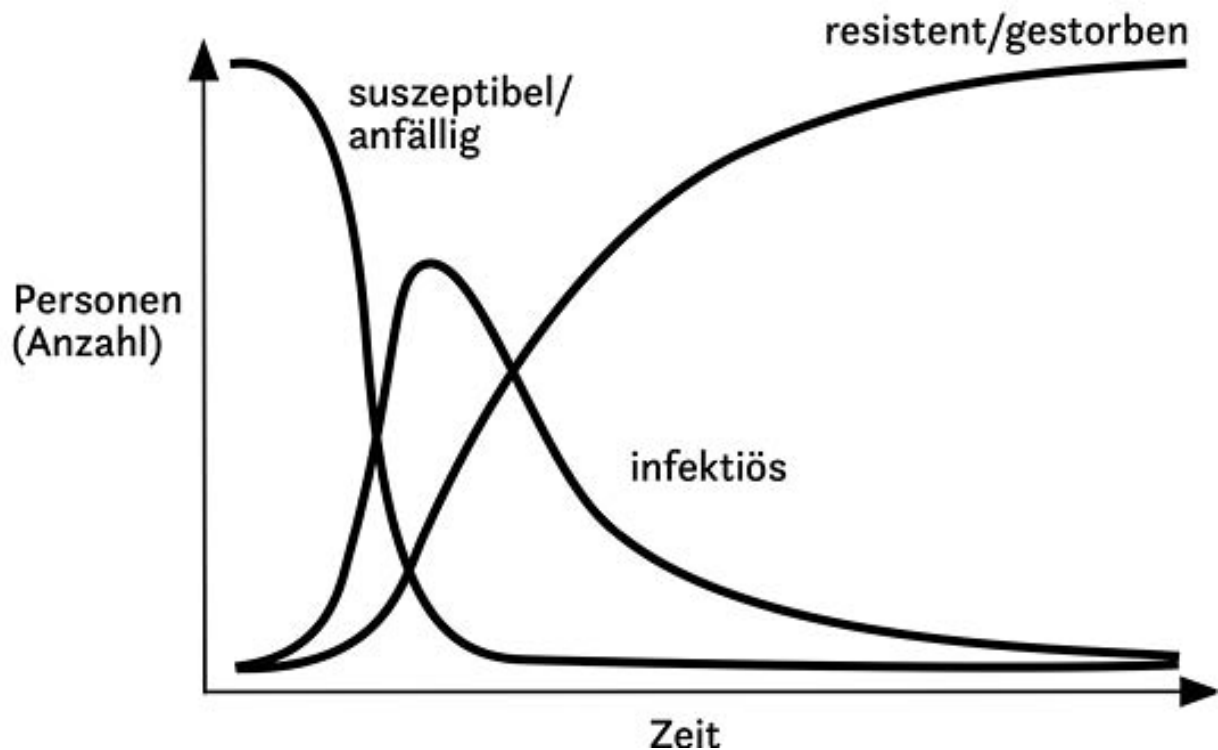
All das klingt sehr gut, doch wie ich schon bemerkte, bewegen wir uns hier noch auf der Ebene von Berechnungen, von denen einige allzu sehr vereinfachen. Am nächsten Schritt in Richtung eines realistischeren Modells sind Faktoren beteiligt, die die Ausbreitung der Krankheit hemmen, sobald eine größere Anzahl von Personen infiziert ist. So blieben beispielsweise viele Menschen zu Hause und steckten sich daher nicht so leicht mit dem Virus an. Menschen, die sich infiziert haben und genesen sind, verfügen über eine gewisse und, wie sich herausgestellt hat, ganz passable Immunität. Menschen, die sich infiziert haben und nicht genesen sind, sterben, daher können sie sich nicht erneut anstecken oder andere infizieren. Die nächste Ebene des mathematischen Modells, die als logistisches Wachstum bezeichnet wird, berücksichtigt solche Faktoren. Die Anzahl der Infizierten wächst anfangs exponentiell, aber mit zunehmender Infiziertenzahl flacht die Wachstumsrate ab und sinkt schließlich. Die Anzahl der Infektionen nimmt noch eine ganze Weile weiter zu, stabilisiert sich jedoch allmählich auf einem festen Niveau.

Epidemiologen verwenden raffiniertere Versionen logistischer Wachstumsmodelle, die eine realistischere Abbildung der Infektionsausbreitung ermöglichen. Die Standardmodelle werden als Kompartiment-Modelle bezeichnet. Konzeptuell unterteilen diese Modelle die Bevölkerung in «Kompartimente», die mithilfe von Mathematik berücksichtigen, wie viele Personen darin sich in einem

bestimmten Gesundheitszustand befinden, und die simulieren, wie sich Personen von einem Kompartiment zum nächsten bewegen. Ein Beispiel ist das SIR-Modell; es hat drei Kompartimente:

- S: susceptible (anfällige/ansteckungsgefährdete) Personen – also solche, die noch nicht erkrankt sind, aber erkranken können, wenn sie mit jemandem aus dem nächsten Kompartiment zusammentreffen.
- I: infektiöse/ansteckende Personen – die gegenwärtig erkrankt sind und die Krankheit weitergeben können. Irgendwann bewegen sie sich in ein anderes Kompartiment weiter. R: aus Kompartiment I entfernte (englisch *removed*) Personen, sei es, dass sie genesen, resistent geworden oder gestorben sind.

Mit jedem Kompartiment ist zu jedem Zeitpunkt eine Zahl verknüpft: wie viele Personen sich «in» diesem Kompartiment befinden. Das Modell verwendet eine Differenzialgleichung, um vorherzusagen, wie sich diese Zahlen in Abhängigkeit von der Zeit verändern. Differenzialgleichungen spezifizieren nicht die Zahlen selbst, sondern geben an, wie rasch sie sich verändern, also im Grunde, wie sich die Krankheit in der Population ausbreitet.



Die Abbildung zeigt typische zeitliche Verläufe für die Zahl der suszeptiblen, infektiösen und aus Kompartiment I «entfernten» resistenten bzw. verstorbenen Personen (R) im SIR-Modell. Die Zahl der anfälligen Personen nimmt ab, wenn sich immer mehr von ihnen anstecken. Die Infektionen steigen an, erreichen einen Gipfel und gehen schließlich wieder zurück. Die Zahl der R-Personen ist anfangs klein, steigt dann recht rasch an und strebt schließlich einem konstanten Maximalwert zu. Der zeitliche Verlauf dieser Veränderungen hängt von der Infektion und ihren Ausbreitungsbedingungen ab.

Die Modelle weisen dieselbe Struktur für alle (geeigneten) Krankheiten auf, beziehen aber auch «Parameter» ein – Zahlenwerte, die für eine bestimmte Krankheit konstant sind,

sich aber von einer zur anderen Krankheit unterscheiden. Der R-Wert ist ein solcher Parameter, der uns sagt, wie sich die Infektion von einer Person zur anderen ausbreitet. Andere Schlüsselparameter sind die Inkubationszeit (Zeitspanne zwischen Infektionsbeginn und dem Auftreten erster Symptome) und die Infektionsperiode (Zeitspanne, in der eine infizierte Person ansteckend ist). Und natürlich spielt auch die Todesrate (Mortalität) eine wichtige Rolle.

Es gibt viele standardisierte Epidemiemodelle desselben Typs. So enthält das SEIR-Modell beispielsweise ein zusätzliches Kompartiment E: Personen, die der Krankheit ausgesetzt («exponiert») sind. Eine der frühesten Lockdown-Maßnahmen in vielen Ländern bestand darin, Personen, die sich anstecken können (also suszeptibel sind), aufzufordern, zu Hause zu bleiben. Das hat sofort zur Folge, dass sich das S-Kompartiment in zwei Kompartimente aufspaltet: Personen, die suszeptibel sind, der Krankheit aber nicht ausgesetzt sind, weil sie nicht mit Infizierten in Kontakt kommen, und Personen, die sowohl suszeptibel als auch exponiert sind. Nur Personen im Exponiert-Kompartiment können sich anstecken. Sie können je nach Umständen zwischen S- und E-Kompartiment wechseln, und das Modell stellt Parameter bereit, die die durchschnittliche Bewegung zwischen beiden widerspiegeln.

Wenn man diese und andere, ähnliche Modelle mathematisch analysiert, kommt bei den Berechnungen ein wichtiger Faktor zum Vorschein: Die Rede ist vom Konzept der

«Herdenimmunität». Wenn ein genügend großer Teil der Bevölkerung immun ist, sei es durch eine Impfung oder nach Genesung von der Krankheit, dann erlischt die Krankheit, selbst wenn viele Menschen noch nicht immun sind. Der R-Wert kann noch immer über 1 liegen, aber suszeptible Menschen treffen nicht mehr häufig genug auf infektiöse Menschen, damit sich die Krankheit so rasch ausbreiten kann, dass die Gesamtzahl der Infizierten ansteigt. Es wird allgemein angenommen, dass die britische Regierung anfangs eine Strategie verfolgte, die keinen ernsthaften Versuch unternahm, COVID-19 zu kontrollieren, sondern vielmehr hoffte, eine unkontrollierte Ausbreitung werde zu Herdenimmunität führen. Das könnte die Verzögerung bei der Einführung von Restriktionen erklären, obwohl es klare Anzeichen für die Gefährlichkeit der Infektion gab. Leider müssen bei COVID-19 für eine Herdenimmunität jedoch offenbar 90–95 Prozent der Bevölkerung immun sein. Als Modelle ergaben, dass eine Viertelmillion Menschen würde sterben müssen, um die Herdenimmunität ohne Intervention zu erreichen, änderte die Regierung ihre Strategie. Ich sollte anmerken, dass die Regierung selbst leugnet, jemals diese Art Herdenimmunität als Strategie erwogen zu haben. Wenn das tatsächlich der Fall ist, bleibt die anfängliche Untätigkeit allerdings unerklärt.

Ein weiterer Fachausdruck, auf den man häufig stößt, ist das «Abflachen der Kurve». Es lässt sich nur schwer kontrollieren, wie viele Menschen sich *letztlich* infizieren, denn in irgendeinem Stadium muss sich das Leben mehr oder minder

normalisieren. Restaurants müssen wieder öffnen dürfen, die Menschen können nicht länger zu Hause bleiben, Zug- und Flugreisen müssen wieder möglich sein. Anderenfalls würden die wirtschaftlichen Kosten schlimmer sein als die Krankheit und genauso tödlich. Wenn aber zu viele Menschen etwa um die gleiche Zeit erkranken, können Ärzte und Krankenschwestern die Lage nicht meistern. Indem man das Verhalten der Menschen mit Maßnahmen wie Maskenpflicht, Social Distancing und dem Verbot von Großveranstaltungen kontrolliert, lässt sich die Belastung des Gesundheitssystems über einen längeren Zeitraum strecken. Zwar wird etwa die gleiche Anzahl von Personen ins Krankenhaus kommen, aber nicht zur gleichen Zeit. Daher bildet die Anzahl der Infektionen in Abhängigkeit von der Zeit, also die «infektiös»-Kurve in der Abbildung, statt eines ausgeprägten Gipfels einen flacheren Hügel. Wie die Modelle überdies zeigen, gilt: Je früher solche Maßnahmen ergriffen werden – am besten, *bevor* die Probleme einen kritischen Punkt erreichen –, desto weniger schädlich sind die Auswirkungen in gesundheitlicher wie auch in wirtschaftlicher Hinsicht.

Das SIR-Modell und andere Kompartiment-Modelle wie SEIR basieren auf der Annahme, dass jedes Mitglied der Bevölkerung in derselben Weise betroffen ist. Das Modell mittelt alles über die gesamte Population, sodass individuelle Variationen unter den Tisch fallen und jedermann als uniforme «Durchschnittsperson» behandelt wird. Ein Merkmal von COVID-19 – ein ziemlich verblüffendes, vor allem anfangs – ist

jedoch, dass die Infektion für ältere Menschen gefährlicher ist. Eine Zeit lang behaupteten dagegen viele Regierungen kategorisch: «Kinder stecken sich nicht an.» Die meisten Eltern fanden das nicht plausibel: Wenn das stimmte, wäre COVID-19 – abgesehen von Geschlechtskrankheiten – die erste Infektion in der Geschichte der Menschheit, die nicht von Kindern weiterverbreitet würde. Wie aktuellere Untersuchungen zeigten, infizieren sich Kinder genauso oft mit COVID-19 wie Erwachsene, haben dieselbe «Virenlast» (Menge an Viren im Körper) wie Erwachsene und sind auch genauso infektiös wie Erwachsene. Die meisten Kinder entwickeln jedoch keine lebensbedrohlichen Symptome – auch wenn es in einigen Fällen leider vorkommt. Wahrscheinlich hängt dies damit zusammen, wie effektiv das Immunsystem arbeitet und, wie es inzwischen scheint, ob die Infektion das Immunsystem veranlasst, den eigenen Körper anzugreifen, statt ihn zu verteidigen; eine Taktik, die das Virus nutzt. Kinder haben meist ein höchst effektives Immunsystem, ältere Menschen häufig nicht; dies gilt vor allem für ältere Menschen mit schweren Vorerkrankungen wie Herzerkrankungen, vielen Krebsformen, Lungenproblemen und anderen mehr. Tatsächlich könnten solche Probleme der Hauptgrund für schwere Symptome bei älteren Menschen sein, weniger das Alter selbst.

Das Hauptproblem bei der Modellierung von altersabhängigen Effekten oder überhaupt Effekten, die sich von Person zu Person unterscheiden, besteht nicht in der

Aufstellung des Modells an sich, sondern darin, genügend verlässliche Daten zu finden, um sie ins Modell einzuspeisen. Kompartiment-Modelle können zusätzliche Kompartimente für unterschiedliche Altersgruppen mit jeweils unterschiedlichen Parametern enthalten. Eine ältere S-Person kann zu einer älteren I- bzw. R-Person werden, und Gleiches gilt für Kinder, wobei es unterschiedliche Parameter für jeden Wechsel zwischen den Gruppen gibt. Ein S-Kind kann jedoch nicht zu einem I- oder R-Erwachsenen werden – nicht im Zeitraum der Infektion, die sich im Verlauf von Wochen statt von Jahren abspielt. Das Modell muss überdies die Tatsache widerspiegeln, dass Erwachsene sich bei Kindern und Kinder sich bei Erwachsenen anstecken können.

Trotz dieser einschränkenden Annahmen können Kompartiment-Modelle oft als nützlicher Leitfaden dienen. Sie haben zudem den Vorteil, dass sie leicht zu berechnen sind. Es gibt raffiniertere Modelle, die auf der Komplexitätswissenschaft basieren und in denen jedes Individuum als separater «Agent» mit eigenem Level an Immunität, Exposition etc. betrachtet wird. Sie zeigen, wie die Ausbreitung der Infektion durch Kontakte zwischen Agenten vorangetrieben wird. Die Agenten und ihre Kontakte lassen sich als Netzwerk darstellen, als eine Ansammlung von Punkten (die als Knoten oder Vertex bezeichnet werden): einer für jede Person, wobei Linien (sogenannte Kanten) Individuen verbinden, die miteinander in Kontakt kommen. Diese Netzwerke können auf statistischen Informationen basieren, zum Beispiel, wie häufig eine

bestimmte Person mit einer anderen in Kontakt kommt oder wie viele Kontakte sie im Durchschnitt täglich hat. Sie können sich im Lauf der Zeit verändern. Um die Realität besser widerzuspiegeln, können sie auf «Big Data» fußen, den riesigen Informationsmengen, die sich heutzutage sammeln, speichern und computertechnisch verarbeiten lassen.

Noch besser ist, dass sich all diese Ansätze kombinieren lassen. Kürzlich haben Serina Chang und ihre Mitarbeiter im renommierten Wissenschaftsjournal *Nature* den Artikel «Mobility network models of COVID-19 explain inequities and inform reopening» veröffentlicht, der genau das beschrieb. Sie kombinierten das SEIR-Modell mit höchst detaillierten Netzwerkmodellen der Infektionsübertragung für verschiedene Treffpunkte und Menschengruppen. Dazu benutzten sie Mobiltelefondaten, um die Bewegungsprofile von 98 Millionen Amerikanern zu verfolgen, und stellten die Daten als Netzwerk dar, das die stündlichen Bewegungen von 56945 Personen zwischen 552758 Treffpunkten kartierte. Sie verwendeten dabei 5,4 Milliarden zeitlich veränderliche Kanten, die im Einstundentakt neu bestimmt wurden. In Kombination mit einem einfachen SEIR-Modell passten die Ergebnisse gut zu den Beobachtungen, obwohl die Bevölkerung ihr Verhalten im Lauf der Zeit veränderte.

Das resultierende Netzwerk sagte voraus, wie sich das Öffnen oder Schließen bestimmter Treffpunkte – Restaurants, Friseursalons, Sportstadien – auswirken würde. Wie das Modell zeigt, ist eine kleine Zahl «Superspreader»-Treffpunkte für

einen Großteil aller Infektionen verantwortlich. Demnach sei es zur Infektionskontrolle vermutlich effizienter, die Zahl der Menschen an solchen «Superspreader»-Punkten zu reduzieren, als die Mobilität allgemein einzuschränken. Das Modell sagt korrekt auch höhere Infektionsraten unter Angehörigen benachteiligter ethnischer und sozioökonomischer Gruppen voraus, für die es schwieriger ist, ihre Mobilität einzuschränken, und die stärker bevölkerte Orte besuchen müssen.

Solche Modelle können umfangreiche reale Daten benutzen, um Epidemien und Pandemien wirksam zu bekämpfen, auch wenn wir diese nicht verhindern können. Wir können mögliche Vorgehensweisen in einem Computermodell testen, bevor wir uns für eine Strategie entscheiden. In jüngerer Zeit wurden solche Methoden in Großbritannien eingesetzt, um Ausbrüche der Maul- und Klauenseuche bei Rindern zu kontrollieren. Und weiteres Modellieren im Anschluss hat die verwendete Strategie noch verfeinert.

Die Mathematik kann sogar neue Möglichkeiten zur Ressourcennutzung aufzeigen. In der Anfangsphase der COVID-19-Pandemie kam es zu einem Mangel an Tests, die herausfinden sollten, wer sich infiziert hatte. Wenn das Infektionsniveau niedrig ist, besteht eine Möglichkeit, Tests besser zu nutzen, indem man eine recht große Anzahl von Personen – sagen wir 100 – einem «Pooltest» (auch Batchtest) unterzieht, welcher ihre Proben zu einem Sammeltest zusammenführt. Ein einziger Test des gesamten Pools kann

dann zeigen, dass niemand infiziert ist, oder er kann zeigen, dass jemand infiziert ist, ohne aber zu wissen, wer es ist. Die schlichte Vorgehensweise ist dann, jeden Teilnehmer einzeln zu testen. Bei dieser Methodik verbraucht man einen zusätzlichen Test, wenn der Pool positiv ist, spart aber 99, wenn er negativ ausfällt – was gewöhnlich zutrifft, solange das Infektionsniveau niedrig ist – wie zu Anfang einer Pandemie, wenn zudem Testmaterialien knapp sind.

Raffiniertere Methoden zur Sammelanalyse von Proben können die Zahl der Tests optimieren, die zur Identifikation von Infizierten erforderlich ist. Ein einfaches Schema dieser Art besteht darin, die 100 Personen auf ein 10×10 -Gitter zu verteilen und dann jeweils Proben von Personen aus derselben Reihe und von Personen aus derselben Spalte zu kombinieren. Diese 20 Proben werden getestet. Ist niemand infiziert, sind alle Tests negativ. Wenn genau eine Person infiziert ist, sind genau zwei Tests positiv, nämlich die für die Reihe und die Spalte der betreffenden Person. Das offenbart dann sofort, welche Person infiziert ist. Sind zwei Personen infiziert, identifizieren Reihe und Spalte maximal vier Personen, die dann separat getestet werden können. Mathematiker untersuchen «Blockdesigns» dieses Typs seit Jahrzehnten.

Wird die Infektionsrate zu hoch, bringt es nichts mehr, Proben auf diese Art zu kombinieren, doch solange die Inzidenz recht niedrig ist, lassen sich auf diese Weise viele unnötige Tests einsparen. Sie ist daher im Frühstadium einer Pandemie am nützlichsten. Methoden dieser Art verlangen jedoch eine

spezielle Ausrüstung, um Proben auf die richtige Weise zu mischen; daher muss alles im Vorhinein vorbereitet werden, insbesondere, wenn komplexe Blockdesigns zum Einsatz kommen.

In Zukunft können wir eine verstärkte Nutzung von künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen ins Auge fassen. Beispielsweise kann man einem Computer beibringen, Muster zu erkennen und Modelle zu konstruieren, die die Ausbreitung einer Infektion vorhersagen und die in Echtzeit auf den neuesten Stand gebracht werden können, sobald Informationen über die Infektion vorliegen.

All diese Methoden basieren auf mathematischen Strukturen und Prozessen, doch sie erfordern eine Vielzahl von Berechnungen. Daher wurden sie erst einsetzbar, als wirklich leistungsstarke Computer aufkamen. Die Fortschritte auf diesem Gebiet sind beeindruckend: Computerübersetzungen, Bilderkennung wie die von Gesichtern, Schach- und Go-Spielen, Ableitung der dreidimensionalen Struktur von Proteinen aus der in der DNA codierten Aminosäuresequenz.

Wenn Computer in dieser Weise eingesetzt werden, können indessen viele praktische und ethische Probleme auftreten. Hat eine Maschine erst einmal «gelernt», eine bestimmte Aufgabe auszuführen, ist es sehr schwer, genau zu verstehen, was der Computer eigentlich macht. Gesichtserkennungssysteme können zur Aufklärung oder Verhinderung von Verbrechen verwendet werden, doch sie können auch Menschenrechte verletzen. Es ist also unsere Aufgabe zu kontrollieren, wie

solche Methoden eingesetzt werden. Doch sie können sehr effizient sein, wenn wir sie in akzeptabler Weise gebrauchen.

Noch vor wenigen Jahrzehnten existierten viele dieser Methoden zur Bekämpfung einer Pandemie nicht. Sie sind keineswegs perfekt, doch sie ergänzen andere Methoden. Überdies liefern sie einigermaßen objektive Maßstäbe für Erfolg oder Misserfolg einer Maßnahme – was nicht alle Regierungen begrüßen. Der menschliche Faktor bringt Ungewissheiten ins Spiel, die schwieriger zu quantifizieren sind. Unsere Fähigkeit, Impfstoffe zu entwickeln und herzustellen, hat spektakulär zugenommen, sogar noch während der Pandemie. Jedoch haben einige Nationen weitaus mehr Vakzin zur Verfügung als andere, entweder weil letztere nicht über ausreichende finanzielle Mittel verfügen oder weil die Regierungen zu langsam reagiert haben. Die Impfbereitschaft spielt ebenfalls eine Rolle und hängt unter anderem davon ab, wie viele Menschen auf «Querdenker»-Desinformationen hereinfließen, ein tragischer Nebeneffekt eines anderen technologischen Fortschritts, des Internets. Aber selbst diese Eigenarten, die in der Natur des Menschen gründen, lassen sich bis zu einem gewissen Grad mathematisch analysieren, beispielsweise mithilfe von Big Data und Wahrscheinlichkeitstheorie.

Vor wenigen Jahrhunderten galten Seuchen und Pandemien als zufällige Naturereignisse und wurden häufig einer Gottheit zugeschrieben, die die Menschheit für angebliche Sünden strafte. Mit wachsendem medizinischem Wissen begannen wir

allmählich zu verstehen, dass sie rational nachvollziehbare Gründe hatten. In diesem Stadium waren die wichtigsten Methoden zur Vorhersage wahrscheinlicher Auswirkungen statistischer Natur, doch inzwischen verfügen wir darüber hinaus über eine Vielzahl dynamischer und rechnerischer Instrumente. Ungewissheit wird unser Leben noch immer durcheinanderbringen, doch jahrhundertelange wissenschaftliche Forschung auf verschiedenen Gebieten – und die Mathematik spielt dabei eine wichtige Rolle – hat uns die Werkzeuge an die Hand gegeben, viele der schlimmsten Auswirkungen abzumildern. Bessere Instrumente zu entwickeln, ist natürlich eine große Aufgabe, ein Problem, an dem Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler seit Jahrzehnten arbeiten und weiter arbeiten werden. Das größte Problem, dem wir uns gegenübersehen, ist jedoch, Regierungen davon zu überzeugen, die Instrumente, über die wir bereits verfügen, klug einzusetzen. Wir müssen unser Verhalten ändern, um zu vermeiden, dass wir uns letztlich selbst verschuldeten Krisen aussetzen. Es braucht keine Götter, uns für unsere Sünden zu strafen – die Natur schafft das ganz allein.

Ian Stewart

Coventry, Großbritannien, im Herbst 2021

Kapitel 1

Die sechs Zeitalter der Ungewissheit

Ungewiss: Der Zustand, nicht genau bekannt oder völlig klar zu sein; Zustand der Zweifelhaftigkeit oder Unklarheit.

The Oxford English Dictionary

Ungewissheit ist nicht immer eine schlechte Sache. Wir mögen Überraschungen, solange sie angenehm sind. Vielen von uns macht es Spaß, auf Pferde zu wetten, und die meisten Sportarten wären langweilig, wenn wir von vorneherein wüssten, wer gewinnt. Manche werdende Eltern legen Wert darauf, das Geschlecht ihres Kindes vor der Geburt *nicht* zu kennen. Und die meisten Menschen, vermute ich, ziehen es vor, nicht im Voraus zu wissen, wann sie sterben werden, geschweige denn, wie sie zu Tode kommen werden. Aber solche Gewissheiten sind Ausnahmen. Das Leben ist eine Lotterie. Ungewissheit führt oft zu Zweifeln, und Zweifel vermitteln ein ungutes Gefühl; daher bemühen wir uns, Ungewissheit zu vermindern oder, besser noch, zu eliminieren. Wir machen uns Sorgen, *was die Zukunft bringt*. Wir sehen uns den

Wetterbericht an, obwohl wir wissen, dass das Wetter notorisch unvorhersehbar ist und die Prognosen oft danebenliegen.

Auch wenn wir Nachrichten schauen, Zeitung lesen oder im Web surfen, ist das Ausmaß unserer Unwissenheit hinsichtlich dessen, was passieren wird, oft riesengroß. Flugzeugabstürze geschehen aufs Geratewohl. Erdbeben und Vulkanausbrüche verwüsten ganze Gemeinden oder sogar große Teile von Städten. Der Finanzsektor boomt und stürzt dann wieder ab, und obwohl wir von «Boom-Bust-Zyklen» sprechen, meinen wir damit nicht mehr, als dass auf ein Hoch (Boom/Hausse) ein Tief (Bust/Baisse) und auf einen Bust ein Boom folgt. Genauso gut könnten wir von einem «Sonnenschein-Regen-Zyklus» sprechen und behaupten, damit das Wetter vorherzusagen. Wenn Wahlen bevorstehen, verfolgen wir die Meinungsumfragen und hoffen, ein gewisses Gespür dafür zu bekommen, wer wohl die Nase vorne hat. In den letzten Jahren hat es den Anschein, als seien die Meinungsumfragen weniger zuverlässig geworden, doch sie sind noch immer in der Lage, uns zu beruhigen oder aufzuregen.

Manchmal sind wir nicht einfach unsicher, sondern sind uns nicht sicher, über was wir unsicher sein sollten. Die meisten Menschen sorgen sich um den Klimawandel, doch eine lautstarke Minderheit beharrt darauf, all das sei nur eine Verschwörung – in die Welt gesetzt von Wissenschaftlern (die gar nicht in der Lage wären, eine Verschwörung zu organisieren, selbst wenn es um ihr Leben ginge) oder von den Chinesen oder den Marsianern ... wählen Sie die

Verschwörungstheorie, die Ihnen am besten gefällt. Doch selbst die Klimatologen, die die Klimaänderung vorausgesagt haben, bieten uns nur wenig Gewissheit über deren präzise Auswirkungen. Sie haben jedoch durchaus eine recht klare Vorstellung von der allgemeinen Natur des Phänomens, und in praktischer Hinsicht ist das mehr als genug, um die Alarmglocken zum Schrillen zu bringen.

Wir sind uns nicht nur unsicher, welche Probleme Mutter Natur für uns bereithält, wir sind uns nicht einmal allzu sicher, welche Probleme wir uns selbst bereiten. Die Weltwirtschaft hat sich immer noch nicht gänzlich von der Finanzkrise des Jahres 2008 erholt; unterdessen führen die Leute, die sie ausgelöst haben, ihre Geschäfte weitgehend so weiter, als sei nichts geschehen, was irgendwann wahrscheinlich in einer noch größeren Finanzkatastrophe enden wird. Wir haben so gut wie keine Ahnung, wie man globale Finanzentwicklungen vorhersagen könnte.

Nach einer Periode relativer (und historisch ungewöhnlicher) Stabilität wird die Weltpolitik zunehmend fragmentarischer, und alte Sicherheiten werden erschüttert. «Fake News» unterdrücken echte Fakten und ertränken sie in einer Flut von Desinformation. Wie vorhersehbar, sind diejenigen, die sich am lautesten darüber beklagen, oft auch diejenigen, die für diese Fälschungen verantwortlich sind. Das Internet hat, statt Wissen zu demokratisieren, Ignoranz und Scheinheiligkeit demokratisiert. Das Entfernen der Torhüter

hat dazu geführt, dass die Tore nun aus ihren Angeln gehoben sind.

Menschliches Handeln war schon immer eine verworrene Angelegenheit, doch selbst in den Naturwissenschaften ist die alte Vorstellung, dass die Natur exakten Gesetzen gehorcht, einer flexibleren Sichtweise gewichen. Wir können Regeln und Modelle finden, die näherungsweise wahr sind (auf manchen Gebieten heißt dieses «näherungsweise» «auf zehn Dezimalstellen genau», auf anderen hingegen «zwischen zehn Mal größer und zehn Mal kleiner»), doch bleiben sie immer vorläufig, bis sie aufgrund neuer Erkenntnisse ersetzt werden. Die Chaostheorie sagt uns, dass etwas selbst dann, wenn es *tatsächlich strikten Regeln* folgt, unvorhersagbar sein kann. Die Quantentheorie sagt uns, dass das Universum ganz tief unten, auf dem kleinsten Level, *prinzipiell* unvorhersagbar ist. Ungewissheit ist nicht nur ein Zeichen menschlicher Unwissenheit; es ist der Stoff, aus dem die Welt gemacht ist.

Wir könnten, was die Zukunft angeht, einfach fatalistisch sein, wie es viele Menschen sind. Die meisten von uns fühlen sich mit dieser Lebenseinstellung jedoch nicht wohl. Wir befürchten, sie könne zu einer Katastrophe führen, und wir haben das schleichende Gefühl, mit ein wenig Vorausschau ließe sich ein Desaster abwenden. Angesichts einer Situation, in der wir uns unwohl fühlen, besteht eine verbreitete menschliche Taktik darin, uns davor zu schützen, oder zu versuchen, diese Situation zu ändern. Aber welche