

Eduard Kaeser

Geologie im Anthropozän

Referat zum Geologentag, Baden, 24. März 2022

Man spricht heute bekanntlich vom neuen geologischen Erdzeitalter des Anthropozäns. Der Einfluss des Menschen auf seine Umwelt erreicht eine Wucht, die man früher allein den Naturgewalten zusprach. Er gestaltet die planetarischen Umweltbedingungen in einem kaum ermessbaren Ausmass um. «Der Mensch erscheint im Holozän» lautet der Titel eines Romans von Max Frisch. Im Anthropozän verschwindet allmählich die Natur.

Ich will mich hier nicht in apokalyptischen Rhapsodien ergehen. Mein Thema ist nicht der Mensch als geologische Kraft, sondern der Mensch als Erforscher unter den neuen Randbedingungen. Ich möchte auf einige – wie mir scheint – fundamentale Veränderungen im wissenschaftlichen Forschungsstil eingehen, die auch für die Geologie Bedeutung und Konsequenzen haben. Um Ihnen vorweg die Richtung meiner Argumentation einsichtig zu machen, stelle ich sie unter das Schlagwort «Von der theoriegeleiteten zur datengesteuerten Forschung». Ich beginne mit einer kleinen wissenschaftstheoretischen Erörterung.

Naturwissenschaft sucht Phänomene durch Regularitäten zu erklären. Dabei gibt es einen fundamentalen Unterschied, der eigentlich schon die ganze Problematik enthält. Nehmen wir ein für Geologen naheliegendes Beispiel: Steine auf der Erde fallen – sich selbst überlassen – zu Boden. Das ist eine Regularität, basierend auf der Verallgemeinerung unserer Erfahrung. Sie wurde meines Wissens bisher nicht falsifiziert. Betrachten Sie jetzt den folgenden Satz: Steine auf der Erde fallen aufgrund des Gravitationsgesetzes zu Boden. Das ist auch eine Regularität, eine jedoch, die implizite eine theoretische Begründung durch ein Naturgesetz liefert. Sie beruft sich auf ein Gesetz. Regularitäten sagen: So ist es immer gewesen. Gesetze sagen: So ist es, weil es so sein muss. Solche Begründungen finden wir in naturwissenschaftlichen Theorien.

Die erste universelle und fundamentale Theorie der Natur fand in einem einzigen Buch Platz, in der *Philosophiae naturalis Principia Mathematica* von Isaac Newton. Eine Theorien-Kathedrale, die auf den soliden Pfeilern einiger weniger universeller Prinzipien ruhte, und die den Physikern gestattete, immer neue Backsteinmengen einzubauen, so dass sie ins Abstrakte

wuchs und wuchs. Newtons Theorie schuf daher auch ein neues Wissensideal der Naturforschung: des Deduzierens aus universellen, fundamentalen Naturprinzipien. Dieses Ideal begründete einen Wissenschaftsstil – nennen wir ihn «theoriegeleitet» – , der über drei Jahrhunderte hinweg die Physiker zu beispiellosen Leistungen inspirieren sollte, von Newton über Laplace, Boltzmann, Maxwell, Hertz, Einstein, Planck bis zur heutigen Suche nach einer «Theorie von allem».

Dieser Forschungsstil erhält heute – wie angedeutet – Gesellschaft von einem anderen. Es scheint, dass die Wissenschaft die Schwelle zu einer neuen Ära überschritten hat, zum *algorithmusgeleiteten* Forschungsstil. Physik, Biologie, Geologie, Soziologie, Ökonomie bekommen es mit zusehends komplexeren Systemen zu tun. Natürlich sind die Systeme schon immer komplex gewesen. Wir haben das nur nicht gesehen. Nun befähigt uns eine überaus leistungsstarke Computertechnologie die Welt auf einer neuen Skala von Komplexität wahrzunehmen. An vorderster Front operieren künstlich intelligente (KI) Systeme wie neuronale Netzwerke und ihre Deep-Learning-Algorithmen. Sie erweisen sich als unentbehrliche Instrumente der Forschung.

Komplexitätsforschung, das zeichnet sich schon heute ab, wird der dominante Stil des 21. Jahrhunderts. Nichts hat uns das in jüngster Zeit klarer gezeigt als die Epidemiologie. Schon das Virus selbst ist eine hochkomplexe organische Selbstreproduktionsapparatur, zu deren Analyse man KI-Methoden einsetzt. Und es ist mehr als das, nämlich kein schön isolierbares Laborobjekt, sondern ein mit ökologischen, soziologischen, ökonomischen, politischen Bedingungen verschränkter Quasi-Akteur.

Der datengesteuerte Forschungsstil hält Einzug in die Geowissenschaften. Betrachten wir als Beispiel die Erforschung mineralischer Ablagerungen. Es handelt sich um die Suche nach Regularitäten in vorkommenden Ablagerungen. Häufig ist die Kenntnis des Zusammenhangs von Mineralisierung und Umgebungsbedingungen (Gesteinsmasse, -schicht, -struktur, Verwitterung) korrelativ und nicht kausal. Neuerdings kommen KI-Systeme zur Mustererkennung zum Einsatz. Man spricht auch bereits von KI-Geologie. Sie erweist sich natürlich als äusserst wichtig für den Mineralienmarkt. Kaum verwunderlich, dass zum Beispiel chinesische Geologen ein

erhebliches Interesse an den neuen Technologien eigen. Denn China hat enorme mineralische Ressourcen.

So lese ich in einem Artikel von chinesischen Geologen: «Traditionelle Methoden basieren auf kausalen Modellen, aber bei komplexen Phänomenen stösst man mit diesen Methoden auf Hindernisse. Kausalität ist nicht zu trennen von theoretischen Überlegungen, und theoretische Überlegungen sind durch menschliche Faktoren beeinflusst. Aber weil Daten objektiv sind (..) gibt es grundsätzlich keine Interferenz mit menschlichen Faktoren in der Big-Data-Forschung».

1

Nun scheint mir das eine höchst dubiose Aussage zu sein. Eine Art von unreflektiertem Datenpositivismus. Erstens macht eine Deutung – also menschliche Interferenz - Daten erst zur Basis von objektiven Aussagen. Und zweitens liefern bloss Korrelationen oft Fake-Kausalitäten. Ich erläutere das an einem simplen Beispiel.

Angenommen, wir wollen herausfinden, ob Wünschelruten Wasseradern anzeigen – ob sie Adern «muten», wie das im Jargon heisst. Ich meine jetzt nicht, dass das ein spezifisch geologisches Unterfangen sei. Die Wünschelrute ist die unabhängige Variable, die «gewünschte» Ader die abhängige. Wir können eine Korrelation herstellen zwischen den beiden Variablen. Aber um einen aussagekräftigen – nicht-zufälligen – Zusammenhang zwischen Wünschelrute und dem Aufspüren von Adern zu statuieren, genügt es nicht, einfach aufzuzeichnen, wie viele Rutengänger Adern entdeckt haben. Man muss auch fragen, wie viele Rutengänger keine Adern entdeckt haben. Nur die Erfolge aufzulisten schafft Fake-Kausalitäten. Der dadurch angerichtete finanzielle Schaden sei enorm für die Volkswirtschaft, aber auch für kleinere Unternehmen und Privatpersonen, schreibt ein Geophysiker.²

Ein anderer problematischer Aspekt der neuen KI-Systeme liegt in ihrer Undurchsichtigkeit - an ihrem Black-Box-Charakter. Wir können nicht einsehen, wie sie zu ihren Resultaten gelangen. Das ist im Grunde ein Dilemma: *Effizienz oder Verständlichkeit*. Der Neurokybernetiker Aaron Bornstein vom Princeton Neuroscience Institute schreibt: «Modernes Maschinenlernen offeriert eine Wahl zwischen Orakeln: Wollen wir möglichst präzise wissen, was passiert, oder

wollen wir wissen, warum etwas passiert, auf Kosten der Präzision? Das ‚Warum‘ hilft uns, Strategien zu entwerfen und zu wissen, wann unser Modell zusammenbricht. Das ‚Was‘ hilft uns, angemessen in der unmittelbaren Zukunft zu agieren». ³

Wenn ein KI-System effizient Katzen identifizieren kann, mag es egal sein, wie es das tut. Aber stellen Sie sich vor, ein KI-System soll zum Beispiel auf einem Stück Erdoberfläche ein Muster erkennen, wo es sich zu bohren lohnt. Will man da nicht die Gründe für den Output wissen? Vor allem, wenn eine Firma Millionen in die Bohrung investiert. Braucht es da nicht gerade die Expertise des Geologen, der die Daten interpretieren kann? Man unterscheidet schon jetzt begreifliche und unbegreifliche KI-Systeme. Und meiner Meinung nach wird diese Unterscheidung sich in Zukunft als noch relevanter erweisen.

Künstliche Intelligenz ist eine ganz besondere Intelligenz. Sie beruht auf «intelligentem» Raten. Vor kurzem las ich die Anekdote eines Geologen. Er musste im zweiten Studienjahr eine Prüfung in Geomorphologie ablegen. Er hatte sich nicht genügend auf den Stoff vorbereitet, und so verstand er nur einen Teil der Prüfungsfragen. Jedoch erkannte er ein paar Schlüsselbegriffe, und er verband sie einfach ohne grosses Verständnis mit anderen Begriffen, von denen er im Zusammenhang mit Geomorphologie schon etwas gehört hatte. Er arbeitete, anders gesagt, wie eine menschliche Deep-Learning-Maschine. Und er erzielte die Höchstnote.

Der Computerwissenschaftler und Neuropsychologe Gary Marcus hat das einmal an einem Fragebogen illustriert. Die Frage lautet «Was sagen uns Erdbeben über die Geschichte des Planeten?» Vier Antworten standen zur Verfügung:

- A. Das Klima ändert sich permanent.
- B. Die Kontinente verschieben sich ständig.
- C. Dinosaurier starben vor 65 Millionen Jahren aus.
- D. Die Ozeane waren vor Jahrmillionen tiefer.

Geologen antworteten meist korrekt mit B, KI-Systeme mit C. Und warum? KI-Systeme arbeiten wie eine Google-Suche. Sie richten sich nach den wahrscheinlichsten Verknüpfungen von Wörtern aus. «Dinosaurier» korreliert am ehesten mit «Erdbeben», «Geschichte» und «Planet».

.Das sind bloss Kinderkrankheiten des Algorithmus, weiter nichts, sagen viele Designer. Eine naheliegende Lösung könnte darin bestehen, dass man das neuronale Netzwerk trainiert, seinen Output in ein menschlich interpretierbares Format zu übersetzen.

Nichtsdestoweniger stellt die Interpretierbarkeit ein ernsthaftes Problem dar. Das sehen auch kritische Designer. Zum Beispiel Dmitry Malioutov von IBM. Er entwarf für eine grosse Versicherungsgesellschaft ein Programm auf der Basis von Deep Learning: «Wir konnten das Modell unseren Kunden nicht erklären, weil sie nicht in Maschinenlernen ausgebildet waren.» Malioutov bietet aus diesem Grund den Kunden statt Deep-Learning-Maschinen oft ein Regelbasiertes System an, das gut interpretierbar ist. Dieses erweist sich zwar vielfach als weniger präzise als das neuronale Netz, trotzdem entscheiden sich die Kunden für ersteres. «Sie bringen es mehr in Übereinstimmung mit ihren Intuitionen», erklärt Malioutov.

Lassen Sie zum Schluss an den Anfang anknüpfen. Naturgesetze werden in Theorien formuliert, und Theorien sind unentbehrliche Instrumente der Komplexitätsreduktion. Sie vereinfachen eine Welt vertrackter Zusammenhänge und unzählbarer Einflussfaktoren zu einer Welt mit ein paar wenigen Parametern. Naturgesetze stellen immer eine Relation zwischen diesen Parametern her, im besten Fall eine mathematische, etwa zwischen Masse und Energie, oder zwischen der Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion und den Konzentrationen der beteiligten Substanzen. Das ist das ganze Geheimnis der Naturgesetze: Nur weil wir das Geschehen auf einige wenige Parameter reduzieren, weil wir so wenig wissen wollen über die Phänomene, können wir sie exakt und als gesetzmässig beschreiben. Aber wir tun dabei immer so als ob.

Der klassische Wissenschaftsstil beruft sich auf die Universalität von fundamentalen Gesetzen. Sie sind es, die Verbindungen zwischen völlig verschiedenen Phänomenbereichen stiften: das Gravitationsgesetz zwischen dem fallenden Apfel und dem schwarzen Loch; die Elektrodynamik zwischen Licht und Magnetismus; die Relativitätstheorie zwischen Materie und Energie; die Quantentheorie zwischen Teilchen- und Wellenstruktur der Materie. Das Verbindende im neuen Forschungsstil sind jetzt vermehrt die Eigenschaften komplexer Systeme. Solche Systeme können aus völlig unterschiedlichen Komponenten und ihren Wechselwirkungen bestehen - Wassermolekülen, Zellen, Vögeln oder Websites - , und dennoch ein universelles Systemmuster «emergieren» lassen. Dazu braucht es heute notwendig KI-Systeme.

Wenn ich sagte, Komplexitätsforschung sei der wissenschaftliche Stil des 21. Jahrhunderts, dann muss ich im gleichen Atemzug einen Vorbehalt anfügen. Die Forschung stellt Modelle auf, die sich mehr oder weniger verlässlich für Prognosen eignen. Modelle sind immer «falsch», weil sie per se Details vernachlässigen - es kommt darauf an, dass sie brauchbar «falsch» sind. Modellbau erweist sich deshalb als inhärent dilemmatisch. Berücksichtigen Modelle zuwenige Details, sind sie unbrauchbar, weil sie das reale Geschehen nicht repräsentieren. Berücksichtigen sie zuviele Details, sind sie auch unbrauchbar, weil sie fast so unverständlich sind wie das reale Geschehen. Die Kunst des Modellbaus besteht im Navigieren dazwischen. Und dazu braucht es nach wie vor ein menschliches Sensorium, menschliche Intelligenz.

Ohne künstliche Hilfsmittel gäbe es keinen wissenschaftlichen Fortschritt. Die Forschung hat sich immer schon solcher Mittel bedient, denken Sie an das ganze raffinierte mathematische und experimentelle Instrumentarium. Nun erhebt dieses Instrumentarium selbst den Anspruch, intelligent zu sein. Ja, es macht den Anschein, als würde es sich vom Menschen emanzipieren. Ich halte diese Sicht für überkandidelt. Nüchtern betrachtet haben wir es mit einem neuen Ausgleich von künstlichen und menschlichen kognitiven Fähigkeiten zu tun. Schon heute übertreffen uns die Maschinen in vielen Belangen. Aber der Ausgleich der kognitiven Fähigkeiten ist kein Nullsummenspiel. Das weiss im Grunde jede vernünftige Forscherin, jeder vernünftige Forscher.

Aufgabe der Theorie ist, Dinge denkbar zu machen. Und um Dinge denkbar zu machen, muss man Fragen stellen. Das ist die wichtigste kognitive Charakteristikum des Menschen. Erwin Schrödinger, einer der ganz grossen Wissenschaftler des letzten Jahrhunderts, hat einmal eine schöne Charakterisierung der Theorie geprägt. Sie lautet sinngemäss: Die Aufgabe der Theorie ist nicht zu sehen, was bisher niemand gesehen hat, sondern zu denken, was niemand gedacht hat und doch alle sehen. Ich glaube, die Geologie tut gut daran, sich auch künftig an diese Maxime zu halten.

EK, März 2022

¹ <https://doi.org/10.1080/20964471.2018.1564478>

² <http://www.ernstson.de/2010/02/wassersuche-mit-der-wunschelrute-oder-dem-pendel/>

³ Aaron Bornstein: *Is Artificial Intelligence Permanently Inscrutable?* Nautilus, 1.9.2016; <http://nautilus.us/issue/40/learning/is-artificial-intelligence-permanently-inscrutable>.