

lich sind das Eigenschaften, die man einer Maschine niemals wird einprogrammieren können. Oder etwa doch?

Aus diesem Grund achte ich als Mathematiker darauf, in welchem Umfang die neue KI Zugang zu den Galerien, Konzertsälen und Verlagen der Welt gewinnt. Der große deutsche Mathematiker Karl Weierstraß schrieb einmal: «Ein Mathematiker, der nicht irgendwie ein Dichter ist, wird nie ein vollkommener Mathematiker sein.» Wie Ada Lovelace hervorragend demonstrierte, braucht es ebenso viel Byron wie Babbage. Zwar hielt sie Maschinen für begrenzt, aber sie erkannte erstmals deren künstlerisches Potenzial:

Sie könnte auf andere Dinge als Zahlen angewandt werden ... Ließen sich beispielsweise die grundlegenden Beziehungen von Tönen gemäß der Harmonie- und Kompositionslehre auf diese Weise beschreiben und anpassen, dann könnte die Maschine komplizierte, wissenschaftliche Musikstücke beliebiger Komplexität und Länge komponieren.

Dennoch schrieb sie jeden kreativen Akt dem Programmierer zu, nicht der Maschine. Ist es möglich, die Verantwortung mehr in Richtung Code zu verschieben? Die gegenwärtige Generation von Programmierern glaubt das.

In der Frühzeit der KI entwickelte Alan Turing seinen berühmten Test, um die Intelligenz eines Computers zu messen. Ich möchte nun einen neuen Test vorschlagen: den Lovelace-Test. Um den zu bestehen, muss ein Algorithmus ein kreatives Kunstwerk erschaffen, und der Vorgang muss wiederholbar sein (darf also nicht das Ergebnis eines Hardware-Fehlers sein), ohne dass der Programmierer erklären kann, wie der Algorithmus zu seinem Ergebnis gelangt ist. Wir fordern die Maschinen heraus: Sie sollen etwas Neues und Überraschendes erfinden, das Wert hat. Damit eine Maschine als wahrhaft kreativ gelten kann, ist jedoch noch ein zusätzlicher Schritt notwendig: Ihr Beitrag sollte mehr sein als Ausdruck der Kreativität des Programmierers oder der Person, die die Daten zusammengestellt hat. Diese Aufgabe hielt Ada Lovelace für unerfüllbar.



## 2

### Wie erzeugt man Kreativität?

*Der größte Feind der Kreativität  
ist der gesunde Menschenverstand.*

Pablo Picasso

Kreativität wird heutzutage viel Wert beigemessen, was dazu führte, dass eine Reihe von Schriftstellern und Denkern versucht hat, in Worte zu fassen, was Kreativität eigentlich ist, wie man sie anregt und warum sie wichtig ist. Bei einer Komiteesitzung der Royal Society, bei der es darum ging, die Auswirkungen des maschinellen Lernens auf die Gesellschaft in den kommenden Jahrzehnten einzuschätzen, begegnete ich zum ersten Mal den Theorien der Kognitionswissenschaftlerin Margaret Boden. Besonders relevant finde ich diese, wenn es darum geht, die kreative Leistung von Maschinen zu beurteilen.

Boden ist eine originelle Denkerin, die im Laufe der Jahrzehnte viele verschiedene Disziplinen miteinander verschmolzen hat: Philosophie, Psychologie, Medizin, KI-Forschung und Kognitionswissenschaft. Inzwischen ist sie über 80 Jahre alt, mit fliegendem weißem Haar und einem stets aktiven Gehirn, und beschäftigt sich eifrig mit den Zukunftsaussichten der «Blechdosen», wie sie Computer gerne nennt. In diesem Zusammenhang hat sie drei verschiedene Formen menschlicher Kreativität identifiziert.

*Explorative Kreativität* bedeutet, die äußeren Grenzen des bereits Vorhandenen zu erforschen, sie möglichst zu erweitern, sich aber immer noch an die Regeln zu halten. Bachs Musik ist der Höhepunkt einer Forschungsexpedition in die Tonalität, zu der barocke Komponisten aufbrachen, indem sie verschiedene Stimmen miteinander verwoben. Seine Präludien und Fugen erweitern die Grenzen des bis dato Machbaren,

bevor das Genre schließlich aufgebrochen wurde und in die Klassik von Mozart und Beethoven übergang. Renoir und Pissarro ersannen eine neue Möglichkeit, sich die Natur und die Welt um uns herum vorzustellen, aber erst Claude Monet sprengte die Grenzen wirklich mit seinen Seerosen, die er immer wieder malte, bis sich seine Farbtupfer in einer neuen Form der Abstraktion auflösten.

In der Mathematik nimmt diese Art der Kreativität einen besonderen Stellenwert ein. Die Klassifizierung von endlichen einfachen Gruppen ist eine Meisterleistung explorativer Kreativität. Ausgehend von der einfachen Definition einer Symmetriegruppe – einer durch vier einfache Axiome definierten Struktur – haben Mathematiker 150 Jahre lang eine Liste aller denkbaren Symmetrieelemente erstellt und so letztendlich die Monster-Symmetriegruppe entdeckt, die mehr Symmetrien umfasst, als es Atome auf der Erde gibt, und die dennoch in keine andere Gruppe passt. Bei dieser Form der mathematischen Kreativität werden Grenzen überschritten, aber die Spielregeln eingehalten. Der Mathematiker ist dann wie ein Entdecker, der ins Unbekannte vorstößt, aber nicht über die Grenzen unseres Planeten hinausgehen kann.

Boden glaubt, dass die Exploration 97 Prozent der menschlichen Kreativität ausmacht. Diese Form der Kreativität beherrschen Computer besonders gut: Für die Aufgabe, die Grenzen eines Musters oder eines Regelwerks auszuloten, eignen sich Computer, die viel mehr Berechnungen durchführen können als das menschliche Gehirn, perfekt. Aber reicht das? Unter wirklich originellen kreativen Handlungen stellen wir uns in aller Regel etwas völlig Unerwartetes vor.

Die zweite Art von Kreativität ist die *Kombination*. Ein Künstler kombiniert zwei völlig unterschiedliche Gebilde. Oftmals können die Regeln für die eine Welt einen interessanten neuen Rahmen für die andere bilden. Kombination ist im Bereich der mathematischen Kreativität ein äußerst machtvolles Werkzeug. Die endgültige Lösung der Poincaré-Vermutung, die die möglichen Formen unseres Universums beschreibt, wurde durch die Anwendung sehr unterschiedlicher Werkzeuge zum Verständnis der Strömung über Oberflächen gefunden. Das kreative Genie Grigori Perelman erkannte überraschend, dass man über die Art und Weise, wie eine Flüssigkeit über eine Oberfläche fließt, mögliche Oberflächen klassifizieren kann.

Bei meiner eigenen Forschung habe ich Methoden aus der Zahlentheorie angewendet, um Primzahlen zu verstehen und mögliche Symmetrien zu klassifizieren. Die Symmetrien geometrischer Objekte scheinen auf den ersten Blick nichts mit Zahlen gemein zu haben. Aber als wir bei der Sprache, die uns geholfen hat, die Geheimnisse der Primzahlen zu erforschen, die Primzahlen durch symmetrische Objekte ersetzen, ergaben sich überraschende neue Erkenntnisse in der Theorie der Symmetrie.

Auch die Kunst hat von dieser Form der wechselseitigen Befruchtung stark profitiert. Philip Glass entwickelte aus Anregungen, die er durch die Arbeit mit Ravi Shankar erhalten hatte, den additiven Prozess, der das Herzstück seiner minimalistischen Musik bildet. Zaha Hadid verband ihre Kenntnis der Architektur mit ihrer Liebe zu den reinen Formen des russischen Malers Kasimir Malewitsch zu einem einzigartigen Stil kurvenreicher Gebäude. Auch in der Küche haben kreative Meisterköche Küchen aus verschiedenen Teilen der Welt miteinander fusioniert.

Es gibt interessante Hinweise darauf, dass diese Art der Kreativität sich auch für KI hervorragend eignen könnte. Man nehme einen Algorithmus, der Blues spielt, kombiniere ihn mit der Musik von Boulez, und man erhält eine seltsame hybride Komposition, die womöglich eine völlig neue Klangwelt erschafft. Natürlich könnte dies auch in eine armselige Kakophonie münden. Der Programmierer muss zwei Genres finden, die algorithmisch auf interessante Weise miteinander verschmolzen werden können.

Bodens dritte Form der Kreativität ist die geheimnisvollste und am schwersten fassbare von den dreien: die *transformative* Kreativität. Damit sind jene seltenen Momente gemeint, die alles verändern und die es in jeder Kunstform gibt. Man denke nur an Picasso und den Kubismus, Schönberg und die Atonalität, Joyce und die Moderne. Sie sind wie Phasenübergänge, wenn Wasser plötzlich vom flüssigen in den gasförmigen Zustand übergeht. Mit diesem Bild beschrieb Goethe die zwei Jahre, in denen er mit der Arbeit an *Die Leiden des jungen Werther* rang, bis ein zufälliges Ereignis als unerwarteter Katalysator wirkte: «In diesem Augenblick war der Plan zu Werther gefunden; das Ganze schoss von allen Seiten zusammen und ward eine solide Masse, wie das Wasser im Gefäß, das eben auf dem Punkte des Gefrierens steht, durch die geringste Erschütterung sogleich in ein festes Eis verwandelt wird.»