

**Zeitschrift:** Horizonte : Schweizer Forschungsmagazin  
**Herausgeber:** Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung  
**Band:** 29 (2017)  
**Heft:** 113  
  
**Rubrik:** Schwerpunkt Forschen mit KI : science ex machina

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 16.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**



Der Roboter macht eine Pause, die er physiologisch gesehen nicht braucht. Es scheint beinahe so, als würde er sich in menschlichem Verhalten weiterbilden. Erkennen kann er sie vielleicht, aber wird er sie jemals fühlen, die Verliebtheit?

Bild: Reem B #7 [Pal], Barcelona, Spanien, 2010. Vincent Fournier

Der Neue im Team ist ein Roboter. Seine Fähigkeiten sind für die Wissenschaft verheissungsvoll. Können sich Forschende auf ihn verlassen?

Science ex machina



# Roboter als Forscher

Intelligente Maschinen helfen mit, die Forschung zu automatisieren. Einige testen bereits Hypothesen, die sie selber generiert haben.

Von Edwin Cartlidge

**E**in Experiment durchführen, ohne den Schreibtisch zu verlassen, ohne ein einziges Teströhrchen in die Hand zu nehmen oder in ein Mikroskop zu blicken: Das ist die Vision des Unternehmens Emerald Cloud Laboratory. Es will Biologen und Chemikern die Möglichkeit geben, mit einigen Mausklicks Experimente zu designen, Geräteeinstellungen zu wählen und zu überwachen und dann die Daten zu analysieren. Das Konzept des Cloud Computing über die einfache Datenspeicherung hinaus soll reale Experimente über das Internet ermöglichen und den Forschenden so mühsame Routinen abnehmen, damit ihnen mehr Zeit für die Entwicklung ausgereifter Experimente bleibt.

## Zentrifugieren in der Cloud

Emerald bietet seine Leistungen aus einem Lagerhaus am Stadtrand von San Francisco an. Hier stehen reihenweise Labortische, mit Flüssigkeiten hantierende Roboter, automatische Inkubatoren, Zentrifugen und weitere Geräte zur Bearbeitung von Proben. Die spezifischen Anweisungen erhalten sie von den Nutzern über eine webbasierte Schnittstelle. Diese Anlage arbeitet mehr oder weniger autonom rund um die Uhr. So haben Forschende, die ein Experiment in Auftrag geben, die Ergebnisse innerhalb von 24 Stunden.

Noch bieten erst vereinzelte Unternehmen solche Dienste an. Pionierin war die 2012 gegründete Firma Transcriptic, die in einem Lagerhaus nur wenige Kilometer von Emerald entfernt tätig ist. Bereits gibt es unter den Forschenden begeisterte Anhänger des neuen Ansatzes. Einer von ihnen ist Justin Siegel, der an der University of California in Davis im Gebiet der synthetischen Biologie tätig ist. Seines Erachtens können seine Studierenden so mehr und komplexere Experimente realisieren, als wenn sie diese selber durchfüh-

ren müssten. Selbst Studienanfänger oder Gymnasiasten profitieren. «Sie können sich auf das Versuchsdesign konzentrieren, ohne überlegen zu müssen, ob sie für die Durchführung genügend geschickt sind.»

«Die Roboter Adam und Eve wurden nicht als Autoren aufgeführt, weil sie ihre informierte Einwilligung nicht geben konnten.»

Ross King

Emerald droht Opfer des eigenen Erfolgs zu werden. Die Firma hat ihren Cloud-Dienst im vergangenen Oktober lanciert. Nun führt sie bereits eine Liste mit mehreren hundert Laboratorien, die darauf warten, dass die Roboter für sie verfügbar sind. Mitbegründer Brian Frezza ist aber zuversichtlich, dass Emerald den Arbeitsrückstand aufholen kann und bis in etwa einem Jahr die rund hundert Standardexperimente anbieten kann, die in den Life Sciences gefragt sind. Im Moment sind rund 40 im Angebot. «Bis dann wollen wir profitabel arbeiten.»

Die Forschung hat schon viel Erfahrung mit Robotern. Pharmaunternehmen setzen sie seit Jahren für repetitive, zeitaufwendige Aufgaben in frühen Stadien der Medikamentenentwicklung ein. Biotech-Firmen greifen für die Gentechnologie auf sie zurück – die wachsende Nachfrage in diesem Bereich decken Hersteller von Instrumenten wie die in Zürich ansässige Tecan. «Die meisten Laboraufgaben können heute von Maschinen übernommen werden», sagt Ross King, Biologe und Informatiker an der britischen Universität Manchester.

Der Archetyp der automatisierten Wissenschaft ist wohl die DNA-Sequenzierung,

also das Verfahren zur Bestimmung der Abfolge der Basenpaare. Während dies früher eine sehr zeitintensive Aufgabe war, die nur wenige Laboratorien anboten, wird sie heute von Maschinen erledigt, die millionenfach genetisches Material automatisch entziffern. Diese Geräte werden an zentralen Standorten eingerichtet, kaum ein Labor sequenziert selber.

Emerald macht gemäss Frezza etwas völlig anderes: «Statt wie eine Autofabrik in Fließbandarbeit ein Experiment eine Million Mal durchzuführen, machen wir eine Million verschiedene Experimente mit einem Roboter.» Weil aber Roboter nicht sehr effizient darin sind, viele verschiedene Schritte nacheinander auszuführen – statt viele gleiche Prozesse zur selben Zeit –, sind die Geräte durchschnittlich langsamer und teurer als Menschen. Das Unternehmen versucht also nicht, bestehende Auftragsforschungsinstitute, die Roboter und Menschen einsetzen, preislich zu konkurrenzieren.

## Exakt reproduzieren ist ihre Stärke

Die grösste Tugend von Robotern ist nach Ansicht von Frezza die Reproduzierbarkeit oder – mit seinen Worten: die Tatsache, «dass sie immer genau gleich pipettieren». Um dies auszunutzen, hat Emerald eine Reihe von Protokollen entworfen, mit der Forschende dem Roboter Schritt für Schritt vorgeben können, was er tun soll. So wird ein Experiment absolut präzise und eindeutig festgelegt. Frezza glaubt, dass er mit seinem Team nun eine solide Palette solcher Protokolle entwickelt hat. Noch sei allerdings die Schnittstelle zu wenig benutzerfreundlich: «Was die Leute gar nicht mögen, ist das Gefühl, Programmiercodes zu schreiben.»

Auch Richard Whitby von der University Southampton in Grossbritannien betont die Bedeutung der Reproduzierbarkeit. In seiner Disziplin, der organischen Chemie, ist die Vielseitigkeit des Menschen von



grossen Vorteil bei komplexen Reaktionen. Wissenschaftliche Arbeiten geben diese Komplexität aber häufig nicht vollständig wieder, da sie beispielsweise nicht präzisieren, wie schnell Reagenzien eingeführt werden müssen. «Wenn nicht der genaue Wert jedes Parameters in einer Reaktion bekannt ist, wird es schwierig, die Auswirkungen bestimmter Variablen zu bestimmen», erklärt er.

Whitby leitet das britische Projekt «Dial-a-Molecule». Das Projekt will eine Maschine entwickeln, die auf Wunsch ein beliebiges Molekül aus organischen Verbindungen synthetisieren kann, genauso wie Biologen heute bestimmte DNA-Sequenzen per Post bestellen können. Whitby macht sich keine Illusion darüber, welche Hürden noch bevorstehen, und betont, dass eine solche Maschine in der Lage sein müsste, Zehntausende von Reaktionen auszuführen – gegenüber lediglich vier bei der DNA-Synthese.

### Automatisch Hypothesen testen

Noch ambitionierter ist die Vision des Biologen King in Manchester: Er und sein Team wollen «den ganzen Forschungskreislauf automatisieren». Ebenso wie die Cloud-basierten Firmen verwenden sie kommerziell hergestellte Roboter, verknüpfen diese aber mit Systemen der künstlichen Intelligenz. Die Roboter lernen durch Logik und Wahrscheinlichkeitstheorie ein bestimmtes Thema. Die Idee ist, dass sie selber Hypothesen für ihre Beobachtungen formulieren. Dann soll die Maschine ihre eigenen Experimente entwickeln, um ihre Hypothesen zu testen, bevor sie dann wiederum neue Hypothesen entwirft. Diesen Zyklus wiederholt sie viele Male im Bestreben, Neues über die Welt zu lernen.

King ist der Ansicht, dass dieser Ansatz Früchte trägt und dass Maschinen die Arbeit von Forschenden effizienter und genauer machen können. Er begann mit seiner Forschung an der Aberystwyth University in Wales. Dort konzipierte er den Roboter «Adam», der 2008 mehrere zuvor unbekannte Hefe-Gene für Enzyme erfolgreich identifiziert hat. Inzwischen hat King den eine Million Dollar teuren Roboter «Eve» entwickelt, der noch mehr kann: Dieser entdeckte den Wirkmechanismus der seit Langem bekannten Verbindung Triclosan gegen Malaria – womit er wohl die Zulassung des Wirkstoffs als Arzneimittel erleichtern wird.

Neben der Biochemie sind Roboter auch vermehrt in den Materialwissenschaften

anzutreffen. Im vergangenen Jahr berichteten Ingenieure des US Air Force Research Laboratory in Ohio über Ergebnisse eines Roboters mit künstlicher Intelligenz, der Forschung zu Kohlenstoffnanoröhren ausführte. Die zylindrischen Moleküle aus Kohlenstoff sind robust, leicht und leiten Wärme und Elektrizität hervorragend. Die Maschine führte über 600 Experimente selber durch und veränderte dabei die Bedingungen. So konnte sie die theoretischen Vorhersagen zur maximalen Wachstumsrate der Nanoröhren bestätigen.

### Noch kein Paradigmenwechsel

Manche Forschende versuchen sogar, Fortschritte in der Physik zu automatisieren, wenn auch nicht mit eigentlichen Robotern. Hod Lipson von der Columbia University in den USA hat mit seinem Team einen Algorithmus entwickelt, der zufällige Gleichungen generiert und dann einen evolutionären Prozess anwendet, um jene Gleichungen auszuwählen, die am besten mit experimentellen Daten übereinstimmen. 2009 präsentierten sie einen Ansatz, mit dem sie das Verhalten von chaotischen Doppelpendeln modellierten. Das Ergebnis bezeichnen sie als physikalisch aussagekräftige Erhaltungssätze. Zwei Jahre später legten sie Gleichungen zur Energiegewinnung aus dem Zuckerabbau vor, die nach demselben Ansatz unter Verwendung von Daten zum Hefemetabolismus entwickelt wurden.

«Studenten können sich auf das Versuchsdesign konzentrieren, ohne überlegen zu müssen, ob sie genügend geschickt sind.»

Justin Siegel

Aber nicht alle sind überzeugt. Die amerikanischen Physiker Philip Anderson und Elihu Abrahams kritisierten 2009 in einem Brief an die Zeitschrift Science sowohl Kings als auch Lipsons Gruppen, dass diese sich «schwer darin täuschen, was ein wissenschaftliches Unterfangen ist». Sie argumentierten, dass Maschinen zwar vielleicht einen Beitrag zu dem leisten können, was der Philosoph Thomas Kuhn als «normale Wissenschaft» bezeichnete, dass sie jedoch niemals in der Lage sein

### Lexikon der künstlichen Intelligenz

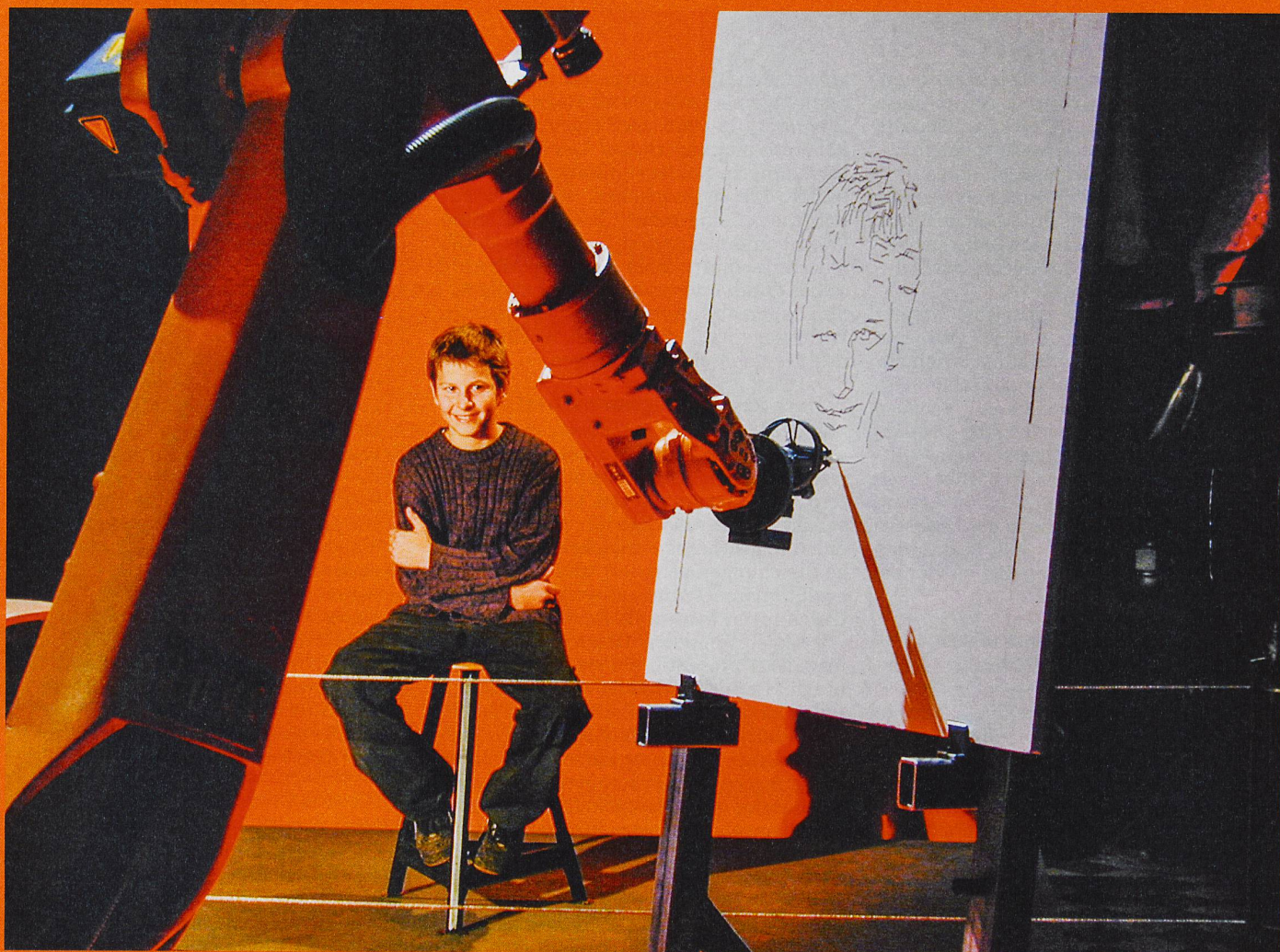
- **Maschinelles Lernen:** Das Gebiet der künstlichen Intelligenz entwickelt selbstlernende Algorithmen für das eigenständige Lösen von Problemen (erkennen, klassifizieren, vorhersagen, übersetzen usw.).
- **Überwachtes Lernen:** Der Algorithmus wird mit Trainingsdaten gespeist (Paare aus Objekt und Kategorie oder Zahlenwert), um daraus ein Modell zur Einteilung neuer Objekte zu entwickeln. **Unüberwachtes Lernen** findet verborgene Datenstrukturen – ohne Trainingsbeispiele.
- **Bestärkendes Lernen:** Das System gibt dem Algorithmus «Belohnungen» für gute Resultate. Dieser passt sich an, um den Erfolg zu maximieren. Typische Anwendung: Schach spielen lernen.
- **Neuronales Netzwerk:** Das von Gehirnstrukturen inspirierte Modell besteht aus einer grossen Zahl miteinander verbundener künstlicher Neuronen. Es kombiniert Eigenschaften des analysierten Objekts neu und generiert dadurch immer abstraktere Darstellungen, was eine Klassifizierung ermöglicht. Das Netzwerk lernt durch Probieren neuer Kombinationen.

werden, echte wissenschaftliche Meilensteine zu setzen, indem sie neue physikalische Gesetze entdecken – wobei die Kritiker hervorhoben, dass bei der Forschung von Lipson zur Pendelbewegung «die relevanten physikalischen Gesetze und Variablen im Voraus bekannt waren».

King räumt ein, dass Maschinen ihre Grenzen haben, und betont, dass ein Roboter, der ein Experiment erfolgreich durchführt, selbst nicht versteht, weshalb. Der Forscher erzählt, dass er und sein Team «Adam» und «Eve» als Autoren in ihrem Paper vermerken wollten. Dies wurde mit der Begründung abgelehnt, dass diese ihre informierte Einwilligung nicht geben konnten. King glaubt, dass intelligente Roboter trotzdem in den wissenschaftlichen Alltag Einzug halten werden. Dafür sprechen die stetig höhere Leistung von Computern, effizientere Algorithmen und Weiterentwicklungen in der Robotik. «Sie werden besser, während die Menschen gleich bleiben», meint er. «Ich sehe keinen Grund, weshalb dieser Trend nicht anhalten sollte.»

Edwin Cartlidge lebt in Rom und schreibt für Science und Nature.





Ein Roboter porträtiert im Museum  
Menschen. Mit einem Stift in der Hand bietet  
er seinen ungewöhnlichen Dienst an. Er  
weiss allerdings nicht, wen er da zeichnet.

Bild: robotlab (2002)



# Augmented Science

Künstliche Intelligenz wird ein immer stärkerer Teil des Forschungsprozesses. Noch verstehen die Forschenden nicht vollständig, was für einen Assistenten sie sich da ins Labor geholt haben. *Von Roland Fischer*

Intelligente Maschinen und selbstlernende Systeme beschäftigen die Forschung seit Jahrzehnten. Erste Berichte von Versuchen mit maschinellem Lernen bei der Identifizierung genetischer Muster wurden vor über 20 Jahren publiziert. Und in der Teilchenphysik wird schon so lange mit künstlicher Intelligenz (KI) experimentiert, dass manche Reviews um das Jahr 2000 sogar ein abflauendes Interesse feststellten. Sie drängten deshalb auf ein rasches Revival der Methode.

«Neuronale Netzwerke wurden schon in den 90er Jahren am Cern in diversen Experimenten studiert und eingesetzt», erinnert sich Sigve Haug vom Labor für Hochenergiephysik der Universität Bern. Man habe dies damals einfach nicht «Machine Learning» genannt.

## Künstliche Intelligenz überall

Heute ist die Nutzung solcher KI-Methoden bei grossen Teilchenphysik-Experimenten schon fast der Normalfall, sei es in der Datenrekonstruktion oder der Datenanalyse. Und sie werden auch oft beim Distributed Computing genutzt, wo Programme lernen müssen, wann und wie Rechenprozesse am effizientesten verteilt werden. Aber KI ist nicht nur am Cern omnipräsent – ganz ähnlich präsentiert sich die Lage plötzlich so gut wie überall. Künstliche Intelligenz ist das Forschungs-Credo der Stunde. Physikalische Chemie, Molekularbiologie, medizinische Genetik, Astrophysik, sogar Digital Humanities: Wo mit grossen Datenmengen hantiert wird, ist auch KI nicht weit.

Ist die Entwicklung hin zur künstlichen Intelligenz als Laborassistent, hin zum Team von Mensch und Maschine in der Forschung also ein zwingender nächster Schritt? «Absolut», sagt Karsten Borgwardt vom Machine Learning and Computational Biology Lab der ETH Zürich. «In vielen Feldern der Lebenswissenschaften, wo mit Hochdurchsatzverfahren gearbeitet wird, geht es schon jetzt nicht mehr ohne.» Die Datenmengen seien schlicht zu gross, wenn man beispielsweise eine halbe Million Krankengeschichten mit den zugehörigen genetischen Daten verknüpfen

möchte. «Da kann kein Mensch mehr mit dem blossen Auge ein sinnfälliges, noch unbekanntes Muster erkennen.» Solchen Datenmengen sei nur noch mit effizienten statistischen Verfahren, wie Spezialisten wie Borgwardt sie derzeit entwickeln, beizukommen. Ohnehin sei die Grenze zwischen Statistik und maschinellem Lernen inzwischen fließend, merkt der junge ETH-Professor an.

Die künstliche Intelligenz als selbstverständlicher Partner im Forschungsprozess: Die Vision erinnert an Garry Kasparovs «Advanced Chess»-Idee, die er kurz nach seiner Niederlage gegen Deep Blue vor genau zwanzig Jahren vorbrachte. In Zukunft sollten nicht mehr Menschen gegeneinander oder gegen Maschinen antreten, sondern Mensch-Maschine-Teams. So könnte das Spiel auf eine ganz neue Ebene gehoben werden, glaubte Kasparov, ein Schach jenseits menschlicher strategischer Möglichkeiten.

Ein System kann  
«überlernen»: Mit  
zunehmendem Training  
wird es schlechter.

«Machine Learning is the scientific method on steroids», schreibt auch der KI-Experte Pedro Domingos der Universität von Washington in seinem Buch «The Master Algorithm». Darin postuliert er so etwas wie eine Super-Machine-Learning-Methode, ein maschineller Allesverstehender. Durch intensiv eingesetzte KI würde die Forschung schneller, effizienter, tiefschürfender. Der Wissenschaftler könnte sich, von der statistischen Routine entlastet, ganz auf die kreativen Anteile seiner Arbeit konzentrieren. Domingo verspricht nichts weniger als eine neue goldene Ära der Wissenschaft.

Nicht alle Forscher, die sich mit KI beschäftigen, mögen in dieses Loblied einfach so einstimmen. Neben Caplar vom Institut für Astronomie der ETH Zürich ist durchaus ein Datennerd: Er betreibt den

Datenblog [astrodataiscool.com](http://astrodataiscool.com) und hat kürzlich mithilfe von maschinellem Lernen den Gender Bias in astronomischen Publikationen quantifiziert.

Der junge Forscher sieht zwar seit ein paar Jahren einen markanten Aufschwung bei Publikationen, die KI enthalten. Aber er hat doch einige Zweifel, ob die Methoden in seinem Feld einen grossen Durchbruch erleben werden. Astronomie sei «eine Wissenschaft von Biases»; es gehe nicht zuletzt darum, die Instrumente möglichst gut zu kontrollieren. Deshalb sollten sie so wenig wie möglich konzipiert werden wie eine «Black Box»: wie ein praktisches Tool, das zwar gute Resultate liefert, dessen genaue Funktionsweise man aber nicht nachvollziehen kann. Beim Umgang mit den Beobachtungsdaten sei die Interpretation durch den menschlichen Forscher nach wie vor zentral, sagt Caplar.

## Gedopte Wissenschaft

«Ach, diese Black Box!» entfährt es seinem Kollegen Kevin Schawinski (siehe auch «Die Physik von allem», S. 30). Alle würden davon reden, dass KI eine Black Box sei – und wir also die Logik und Argumentation der Maschine gar nicht zu hinterfragen vermögen. Der Astronom Schawinski kann bei KI keine Black Box erkennen. Aus seiner Sicht handelt es sich schlicht um eine neue Methode der Forschung, die kalibriert und getestet werden muss, um sie richtig zu verstehen. Das sei nicht anders als bei jeder Methode, die sich die Wissenschaft neu zu eigen gemacht hat, sagt der Forscher. Schliesslich durchschaue kein Einzelner komplexe Versuchsanordnungen wie den Large Hadron Collider am Cern oder das Hubble-Teleskop als Ganzes. Schawinski vertraut da ebenso auf die Forschungs-Community: Diese wisse sicherzustellen, dass der wissenschaftliche Prozess robust funktioniert.

Mit Kollegen von den Computerwissenschaften hat Schawinski die Plattform [space.ml](http://space.ml) lanciert, eine Sammlung von leicht zu bedienenden Tools zur Interpretation von astronomischen Daten. Er selber hat eine Methode entwickelt, um Bilder von Galaxien durch ein neuronales



## «Maschinelles Lernen ist auf einer ewigen Gratwanderung zwischen Blindheit und Halluzination.»

Pedro Domingos

Netzwerk so zu verbessern, dass mehr Informationen extrahiert werden können, und zwar ohne dass der Computer dazu weitere Vorgaben braucht. Bei anderen Anwendungen kommt auch sogenanntes überwachtes Lernen zum Einsatz, bei dem auf ein Daten-Trainingsset zurückgegriffen wird: Von Menschen vorsortiert oder mit Metainformationen versehen, helfen die Trainingssets dem Computer, selber Regeln aufzustellen, die ihn befähigen, eine Aufgabe zu bewältigen.

### Überangepasste Assistenten

Der Biostatistiker Karsten Borgwardt nutzt Überwachtes-Lernen-Methoden, um beispielsweise herauszufinden, ob Veränderungen im Genom eine schädliche Wirkung im Organismus haben. Dabei füttert er den Computer mit bereits erforschten Mustern und hofft, dass dieser in der Folge selbstständig weitere, noch unbekannte Zusammenhänge findet.

«Die Interpretation durch den menschlichen Forscher ist bei Beobachtungsdaten nach wie vor zentral.»

Neven Caplar

Doch es gibt einen Stolperstein: das Overfitting. Der Datenexperte muss im Auge behalten, ob der Computer im Trainingsset tatsächlich die wesentlichen Merkmale erkennt oder ob er sich zufällige Muster im Datenrauschen zur Regel macht. Auch das hat Pedro Domingos auf eine prägnante Formel gebracht: Er sieht maschinelles Lernen auf einer «ewigen Gratwanderung zwischen Blindheit und Halluzination». Auf der einen Seite erkennt der Algorithmus in den Datenbergen gar nichts. Auf der andern Seite des Overfitting beginnt er plötzlich Dinge zu sehen, die gar nicht da sind. Auf diese Weise kann man ein System tatsächlich «überlernen» - mit zunehmendem Training wird es dann wieder schlechter.

Ein Hauptgrund für Overfitting in der Genomik und Medizin ist laut Borgwardt, dass hinsichtlich des Trainingssatzes nicht immer die nötige Transparenz herrscht und deshalb nicht immer einschätzbar ist, wie stark die Trainingsdaten mit den

später auszuwertenden Daten überlappen. Wenn die Sets zu ähnlich sind, kann die Maschine im schlechtesten Fall nicht «generalisieren» und wendet einfach auswendig gelernte Fälle wieder an, falls sie eine Übereinstimmung findet. So entstehe kein echter Erkenntnisgewinn; die künstliche Intelligenz bleibt auf dem Stand einer gewöhnlichen Datenbank.

Auch wenn beim Training alles richtig gelaufen ist: Es bleibt das Problem, Zufallskorrelationen von echten, statistisch signifikanten Zusammenhängen zu unterscheiden. Je grösser die Datenmengen, desto grösser sei auch die Wahrscheinlichkeit, dass bloss aus Zufall gehäufte Genomvarianten vorkommen, sagt Borgwardt - und dass diese dann auch noch mit dem Auftreten einer Krankheit korrelieren. Ein wichtiger Teil seiner Arbeit besteht deshalb darin, Signifikanz in extrem hochdimensionalen Räumen zu bewerten. Das heisst: auch sehr komplexe und naturgemäss multikausale Situationen statistisch zu meistern.

### Maschinelles Lernen für Quanten

Die KI kann nicht nur Zusammenhängen in komplexen Datensätzen nachspüren, sie kann auch ganz neue Materialien kreieren. Doch im Gegensatz zu den Lebenswissenschaften sei maschinelles Lernen in der physikalischen Chemie noch nicht sehr weit verbreitet, sagt der Chemiker und Materialforscher Anatole von Lilienfeld von der Universität Basel. Immerhin sieht auch er einen «rapiden Aufschwung» und glaubt, dass KI «unvermeidlicherweise» in zehn Jahren ein integraler Teil der meisten Studien sein wird.

Die Arbeit seiner Gruppe hat Pioniercharakter: Dank KI konnten die Forscher die Eigenschaften von Millionen theoretisch möglicher Kristalle durchrechnen, die aus vier bestimmten Elementen aufgebaut sind. Dabei identifizierte die KI neunzig bisher unbekannte Kristalle, die thermodynamisch stabil sind und als neuartige Werkstoffe in Betracht kommen. Die Effizienzsteigerung bei der Berechnung der Kristalleigenschaften - mehrere Größenordnungen schneller - verblüfft selbst den Fachmann: Sie ist so enorm, dass «nicht nur konventionelle Probleme gelöst werden können, sondern sich auch ganz neue Forschungsfragen auftun». Aber auch von Lilienfeld gibt ein paar Punkte zu bedenken: Maschinelles Lernen funktioniere

nur, wenn ein Ursache-Wirkung-Prinzip vorliege und genügend Daten zur Verfügung stünden. Entscheidend sei auch, dass der entsprechende Forscher «genügend Expertise besitzt, um effiziente Repräsentationen der zu untersuchenden Objekte und ihrer Eigenschaften zu ersinnen.»

Diese Expertise war auch für den theoretischen Physiker Giuseppe Carleo von der ETH Zürich der entscheidende Punkt. Er hat zusammen mit Kollegen einen Weg gefunden, die Wellenfunktion von Quantensystemen mit einem neuronalen Netz nachzubilden. Nachdem ihm dieser Schritt gelungen war, war die Optimierung der Wellenfunktion «eigentlich ein Kinderspiel». Der Algorithmus erledigte die Aufgabe schnell und ohne Probleme. Herkömmliche Methoden stossen bei solchen Rechenaufgaben rasch an ihre Grenzen: Die Simulation von komplexeren Quantensystemen galt bis vor kurzem noch als rechnerisches «Ding der Unmöglichkeit».

Der neue Ansatz setzt auf die Methode des unüberwachten Lernens (Unsupervised Learning), ohne Vorwissen für den Computer. Er sei für theoretische Physiker auch deshalb interessant, weil er ermögliche, «alte Probleme in neuen Perspektiven» zu sehen - im besten Fall profitierten die Ingenieurwissenschaften und die Grundlagenforschung von den Fortschritten.

Der Physiker hat sich vom letztjährigen Triumph des Algorithmus AlphaGo beim Spiel gegen einen Meister des Go-Spiels inspirieren lassen. Diese KI wurde immer stärker, indem sie unzählige Partien gegen sich selbst spielte. Carleo hat die Methode des bestärkten Lernens (Reinforced Learning), die die Spielintelligenz von AlphaGo in ganz neue strategische Sphären gehoben hat, für seine Zwecke adaptiert.

Er hat der Maschine im übertragenen Sinne beigebracht, die Suche nach der Lösung der Wellenfunktion wie ein Spiel zu sehen, bei dem das Ziel zwar klar ist, der Weg aber ganz offen - und dabei zu lernen, gute Lösungswege zu bevorzugen. Und tatsächlich hat die KI an dem Spiel sehr grossen Gefallen gefunden. So grossen Gefallen, dass sie es nun so gut beherrscht wie keine andere Intelligenz auf der Welt.

Roland Fischer ist freier Wissenschaftsjournalist in Bern.





Erhält der anthropomorphe Roboter einen Geburtstagskuchen? Zentraler ist wohl die Frage, ob er sich über das Geschenk freuen wird. Im Bild ist übrigens eine echte Frau, die als Roboter menschliches Verhalten imitiert.

Bild: Kevin Grennan, Android Birthday, 2011. Video.

Schauspielerin: Sylvi Kim



# Ihr Computer denkt jetzt mit

Mehrere Start-ups vermarkten Programme mit künstlicher Intelligenz zur Unterstützung von Forschenden. Die Idee ist gut, die Realität jedoch ernüchternd. *Von Sven Titz*

Im Schach kann der Mensch den Computer schon seit 20 Jahren nicht mehr besiegen. Neuerdings sollen die Maschinen beim anspruchsvollsten Geschäft mitwirken, das die Menschheit betreibt, nämlich bei der Forschung. Software soll Studien sondieren und beurteilen helfen: Der Computer als smarterer Labor-Butler filtert die Literaturflut und assistiert bei der Peer Review.

## Falsche Zusammenhänge

Die Werbung manch einer Firma tönt sehr optimistisch. Das norwegische Start-up Iris verkündet zum Beispiel, die Suche nach relevanter Forschungsliteratur verbessern zu können. Iris lässt sich auf der Website mit einem Gratistool testen. Nach Auswahl einer Studie zum Start der Suche liefert das Tool Hunderte Resultate, die nach «Schlüsselkonzepten» sortiert sind. Angeblich hängen die ermittelten Studien inhaltlich mit der eingespeisten Studie zusammen. Ein Teil der Resultate taugt jedoch nichts, weil das Tool gelegentlich Begriffsverbindungen für sinnverwandt hält, die nichts miteinander zu tun haben.

Die Literaturrecherche mit Semantic Scholar hingegen wird immerhin schon seit zwei Jahren erprobt. Die Software stammt vom kalifornischen Allen Institute for Artificial Intelligence und nutzt Maschinenlernen, um in Texten wissenschaftliche Konzepte zu erkennen. Bis anhin durchkämmt Semantic Scholar computer- und neurowissenschaftliche Literatur. Weitere Fachgebiete sollen bald folgen. Paul Ginsparg von der Cornell University, einer der Arxiv-Gründer, hebt auf Nachfrage eine Eigenschaft der Suchmaschine als «potenziell ziemlich nützlich» hervor:

Sie berücksichtigt nicht nur die Zahl von Zitierungen, sondern auch ihren Stellenwert – also wer eine Studie zitiert hat und in welchem Kontext.

Intelligente Suchmaschinen wie Semantic Scholar oder auch Sparrho orientieren sich meist an den Literaturlistenbanken Google Scholar und Pubmed und erleben derzeit einen Boom. Allein in den letzten Monaten kamen zwei ähnliche Produkte heraus: Microsoft Academic und Recommended von Springer Nature.

«Das Problem besteht darin, das Fachwissen der Menschen sinnvoll zu integrieren.»

Peter Flach

Manche Firmen hegen noch höhere Ambitionen: Das Start-up Meta in Toronto will ein neues Scanverfahren für Fachliteratur entwickelt haben. Auf dessen Basis entwickeln die Mitarbeitenden Apps, die zum Beispiel mit vielschichtigen neuronalen Netzen arbeiten. Laut Marketing von Meta soll deren App Horizon Scanning den Ursprung eines wissenschaftlichen Konzepts aufspüren können: Sie verfolgt es rückwärts in der Zeit und blättert so das Areal eines ganzen Forschungszweigs auf.

Horizon Scanning ist nach Angaben der Firma für die Pharmaindustrie, Verlage, Forschungskorporationen und Behörden gedacht. Ein Teil der Algorithmen stammt von einer Firma, die an der Entwicklung von Apples Sprachassistenten-Software Siri beteiligt war. Unter den Gründern befinden

sich mehrere Forschende, und kürzlich wurde die Firma durch die Chan Zuckerberg Initiative aufgekauft. Expertinnen und Experten sehen sich mangels konkreter Informationen nicht in der Lage, eine belastbare Einschätzung abzugeben – zum Beispiel Jana Koehler von der Hochschule Luzern oder Peter Flach von der University of Bristol. Die Software wirkt auf sie wie eine Black Box.

## Mehr als vergleichen ist schwierig

Neben der Literaturrecherche werden elementare Formen der künstlichen Intelligenz bereits im Zusammenhang mit der Begutachtung von Fachartikeln genutzt. Flach hat gemeinsam mit Kollegen ein Programm entwickelt, mit dem sich zum Beispiel passende Gutachter für eine Studie finden lassen: Die Open-Source-Software Subsift nutzt dazu fortgeschrittene Matching-Algorithmen für Wortlisten, die Studien und Gutachter beschreiben. Es sei eine sehr grosse Herausforderung, Assistenz-Software für Wissenschaftler zu entwickeln, die über allgemeine Anwendungen wie Suche oder Abgleich («Matching») hinausgehen sollen, sagt Flach. Das Problem besteht darin, das Fachwissen der Menschen sinnvoll zu integrieren. In Zukunft werde man aber zunehmend damit rechnen können.

Sven Titz ist freier Wissenschaftsjournalist.





In «Refactor» wird die malerische Erfahrung des visuellen Künstlers in Computercodes abgebildet. Kunst wird so in Abwesenheit des Malers kreiert. Etwas technischer ausgedrückt visualisiert die Installation kognitive Potenziale digitaler Codes.

Bild: Nikzad Arabshahi (Visual) & Vedad Famourzadeh (Audio), Dezember 2016



# Eine neue Intelligenz, die sich selber nicht versteht

Was ist eine Entdeckung wert, die man nicht versteht? Die Entwicklung intelligenter Maschinen in Laboratorien stellt das eigentliche Wesen des Wissens infrage. *Von Nic Ulmi*

**H**ypothesen formulieren, Entdeckungen machen: Diese Begriffe bilden das Herzstück jedes wissenschaftlichen Ansatzes. Seit Anfang der 2000er Jahre sind Maschinen mit künstlicher Intelligenz daran, dieses Gebiet zu erobern. Sie produzieren auf neuen Wegen Ergebnisse und übernehmen Aufgaben, die einst Menschen vorbehalten schienen. Diese Maschinen, die immer leistungsfähiger werden und doch nicht in der Lage sind, ihre eigenen Erfolge zu verstehen, beschwören eine befremdliche Vision herauf: eine automatisierte, industrielle, von Robotern betriebene Forschung.

Drei Beispiele: An der Tufts-Universität in Massachusetts arbeitet ein Netz aus künstlichen Neuronen daran, ein altes Rätsel der Biologie zu lösen. Es entwickelt eine Hypothese zur Regeneration von Planarien-Süsswasserwürmern, die einen verlorenen Schwanz oder Kopf nachwachsen lassen können. An der Universität Adelaide in Australien wiederum hat ein Roboter das optimale Mittel gefunden, um ein Bose-Einstein-Kondensat herzustellen. Das Gebilde aus Bosonen, die beinahe bis auf den absoluten Nullpunkt gekühlt wurden, veranschaulicht makroskopische Quantenphänomene. Schliesslich haben die Maschinen des Start-ups Insilico Medicine an der Universität Johns Hopkins in Baltimore Moleküle entwickelt, die in der Onkologie nützlich sein könnten.

«Das menschliche Gehirn erbringt im Gegensatz zu Maschinen Abstraktionsleistungen müheles.»

Roger Schank

Roger Schank, ein Pionier der künstlichen Intelligenz (KI), zeigt sich von diesen Beispielen wenig beeindruckt. «Bei allen handelt es sich absolut nicht um künstliche Intelligenz», protestiert er. Der Forscher, der an den Universitäten Yale, Northwestern

und Carnegie Mellon tätig ist, befürchtet, dass sich ein altbekanntes Szenario wiederholen wird: Anfang der 1970er und Ende der 1980er Jahre gab es zweimal einen Hype um die künstliche Intelligenz, beide Male folgte aber eine «Dürreperiode». Die übersteigerten Erwartungen lösten sich auf, das öffentliche Interesse erlosch, die Geldquellen versiegt. «Im Moment ist die Presse begeistert, bald wird sie sich jedoch wieder anderem zuwenden. Das Problem ist, dass dann die Forschung über KI erneut zum Stiefkind wird. Das finde ich schade.»

## Das Steak und der Haarschnitt

Worum handelt es sich dann, wenn nicht um Intelligenz? «Das sind Beispiele für ein Pattern Matching (Musterabgleich, A.d.R.)», antwortet Schank. «Facebook verwendet dieses Verfahren, um Ihr Gesicht auf Fotos zu identifizieren.» Mit anderen Worten: Die Maschinen generieren Motive – das Schema eines Moleküls, den Regenerationsplan eines Strudelwurms –, die sie dann mit Mustern in bestehenden Datenbanken vergleichen. «Wissenschaftler hingegen machen auf eine ganz andere Art Entdeckungen: Am Anfang steht die Ratlosigkeit. Dann formulieren sie eine Hypothese zum Phänomen, das sie nicht verstehen, und testen diese. Genau diesen Prozess nennt man Wissenschaft.»

Roger Schank erzählt gern eine Geschichte, um den Unterschied zwischen menschlichem Entdecken und automatischem Lernen zu veranschaulichen. Er nennt sie «Das Steak und der Haarschnitt»: «Ich diskutierte mit einem Kollegen in Yale und beschwerte mich, dass es mir nie gelingt, ein Steak zu bekommen, das wirklich «saignant» ist: Das Fleisch kommt immer zu lange gebraten auf den Tisch. «Weshalb bloss?», fragte ich mich. «Ich habe früher in England gelebt, und dort schaffte es kein Coiffeur, mir einen Flattop zu schneiden», meinte mein Kollege nur. Heureka! Jede der beiden Geschichten erklärt die andere. Auf einer höheren Abstraktionsebene sind sie identisch. Wir haben es in beiden Fällen mit Personen zu tun, die problemlos fähig wä-



## «Bei Wissenschaftlern steht vor einer Entdeckung die Ratlosigkeit.»

Roger Schank

ren, die verlangte Leistung zu erbringen, die jedoch die Anweisung nicht ausführen, weil sie diese als zu extrem empfinden.» Und die Moral von der Geschichte? «Ein menschliches Gehirn erbringt diese Abstraktionsleistung mühelos. Es ist in der Lage, eine Sache so zu betrachten, als wäre es eine andere. Die Motivation schöpft es daraus, dass wir von Natur aus Ziele haben: unseren Appetit sättigen, unsere Neugierde stillen, die durch etwas Unbekanntes geweckt wurde.»

So funktioniert unser Gehirn. Doch die neue Welle der Forschungsarbeiten und Applikationen im Bereich der KI seit Ende der 1990er Jahre zielt nicht mehr darauf ab, das kognitive Modell des menschlichen Geistes nachzubilden. Diese Wende öffnet die Tür zu einer ganz neuen Wissenswelt, bei der das Know-how durch automatisches Lernen aus Megadaten entsteht. Diese Neuausrichtung hat die KI aus ihrer Lethargie befreit und bereits Früchte getragen: Vorschläge zum Weiterstöbern bei Amazon, Siri, den Sieg von AlphaGo über einen der besten Go-Spieler der Welt oder auch die Voraussage der Genexpression eines Bakteriums gemäss einer Studie der Universität Pennsylvania von 2016.

### Zur Freude der Maschine

Doch kann diese Technologie wirklich wissenschaftliche Erkenntnisse hervorbringen? Oder braucht es dazu das existenzielle Bedürfnis, zu verstehen, den Drang, zu wissen, eine «libido sciendi», wie der Heilige Augustinus es formuliert hätte?

Wie sieht das Jürgen Schmidhuber, Co-Direktor des Instituts Dalle Molle für Forschung im Bereich künstliche Intelligenz (Idisia) in Lugano? Über ihn schrieb die New York Times im November 2016: «Wenn die KI erwachsen geworden ist, wird sie ihn vielleicht «Papa» nennen.» Er entwickelte 1997 den Ansatz des «long short-term memory», den heute Programme zur mündlichen Spracherkennung nutzen. Er ist der Ansicht, dass im Gehirn von Wissenschaftlern, Künstlern und Babys, aber auch in künstlichen neuronalen Netzen vergleichbare Belohnungssysteme wirken können.

Diese verschiedenen Formen von Intelligenz können Genugtuung empfinden, wenn sie im Chaos der Welt Wiederholungen und Regelmässigkeiten entdecken, die ihnen zuvor unbekannt waren.

«Stellen Sie sich ein Programm vor, das eine Bilderreihe modellieren soll, die hundert fallende Äpfel zeigt», erklärt der Forscher. «Ohne die Wirkung der Schwerkraft zu kennen, braucht es sehr viele Bits, um die Daten zu codieren. Sobald jedoch diese Regelmässigkeit erkannt wurde, kann das Programm sie verwenden, um Voraussagen zu machen. Und so benötigt es weniger Bits, um die Information zu speichern. Dieser Unterschied zwischen vorher und nachher, das heisst diese Kompression der Daten, misst die Tiefe der neuen Kenntnisse, die das Netz erworben hat. Dies löst ein Signal der Belohnung aus, ein Moment innerer Freude für das Netz, sozusagen.»

### Entdeckungen werden belohnt

Jürgen Schmidhuber hat diesen Belohnungsmechanismus in seiner formellen Fun- und Kreativitätstheorie formalisiert. Er vergleicht ihn mit der Erfahrung, die ein Musiker macht, wenn dieser eine Harmonie entdeckt, und auch mit dem Humor: «Wenn die Pointe eines Witzes eine unerwartete Wendung in der Geschichte bringt, können plötzlich Daten komprimiert werden. Dann lachen wir. Dieses Phänomen ist zentral, um Maschinen zu programmieren, die über eine künstliche Neugierde verfügen und Entdeckungen machen. Dafür muss das Netz als Duo funktionieren», erklärt der Forscher. «Auf der einen Seite steht der Generator, der Aktionen und Experimente durchführt, die Daten generieren; seine Motivation schöpft er aus dem Bestreben nach einer Maximierung der Belohnungen. Auf der anderen Seite steht das Modell, das jedes Mal eine Belohnung schickt, wenn es eine neue Regelmässigkeit entdeckt und dadurch Daten komprimieren kann. Ein solches System muss man einrichten, um einen künstlichen Wissenschaftler zu schaffen.»

«Das neuronale Netz von Insilico Medicine verwendet ein solches duales System», sagt Polina Mamoshina, Genetikerin und Informatikerin, die am Projekt mitarbeitet. «Der Datengenerator ist so programmiert, dass er virtuell und zufällig molekulare Strukturen schafft. Der Diskriminator trainiert mithilfe von Datenbanken, Moleküle zu erkennen, die fähig sind, das Wachstum von Tumoren zu hemmen. Am Anfang besteht das Ziel des Generators darin, den Diskriminator in die Irre zu führen, damit dieser falsche Identifikationen vornimmt und daraus lernen kann.

«Bei der Pointe eines Witzes können wir plötzlich Daten komprimieren. Dann lachen wir.»

Jürgen Schmidhuber

Von den 60 Molekülen, die der Generator gefunden und der Diskriminator validiert hat, wurden einige bereits als Wirkstoffe gegen Krebs patentiert. «Das ist ein ermutigendes Zeichen für die Präzision des Systems», ergänzt Mamoshina. «Wir werden nun den Prozess der Validierung der übrigen Moleküle *in vitro* und später *in vivo* in Angriff nehmen.» Für die Forscherin revolutioniert dieser Ansatz die Disziplin: Anstatt blind eine grosse Menge von Verbindungen zu durchsieben, besteht das Ziel darin, Medikamente mit massgeschneiderten Eigenschaften zu schaffen.

Während wir auf neugierige Maschinen von Jürgen Schmidhuber warten und auf Systeme, welche die Parallelen zwischen den Geschichten vom Steak und vom Haarschnitt von Roger Schank erkennen, werden das automatische Lernen und die Megadaten die wissenschaftliche Praxis revolutionieren. An der Universität Bristol ruft Nello Cristianini, Professor für künstliche Intelligenz, dazu auf, diese neuen Instrumente positiv aufzunehmen, den Anwendungsbereich aber genau abzustecken:



«Ich arbeite seit 20 Jahren mit maschinellem Lernen. Ich kann sagen, dass es funktioniert. Die Maschine ist in dem Sinne lernfähig, als sie ihre Leistung mit zunehmender Erfahrung verbessert.»

Bereits heute können diese Ansätze einen beträchtlichen Teil der Gewinne von Amazon generieren, wenn die richtigen Bücher den richtigen Leuten empfohlen werden. «Es ist bemerkenswert, dass diese Algorithmen weder ein psychologisches Modell jedes Anwenders enthalten noch ein Modell mit einer Literaturkritik für jedes einzelne Buch», sagt Cristianini weiter. «Sie führen rein statistische Überlegungen durch: Leute mit bestimmten Merkmalen und einem bestimmten Verhalten haben bestimmte Bücher gekauft. Daraus resultiert eine wichtige Erkenntnis: Es ist möglich, eine Prognose zu machen, ohne eine Theorie zu haben.»

«Ich arbeite seit 20 Jahren mit maschinellem Lernen und kann bestätigen, dass es funktioniert.»

Nello Cristianini

Doch lässt sich dieses Modell wirklich auf die Wissenschaft übertragen? «Es gibt keinen philosophischen Grund, der dagegen spricht», antwortet der Forscher. «Ein Computer könnte Molekülmodelle erstellen und ihre Toxizität voraussagen. Was damit gewonnen wäre? Dass ein Medikament *in silico* entwickelt werden könnte, ohne alle möglichen Moleküle herstellen und sie an Mäusen testen zu müssen. Was damit verloren wäre? Dass man nicht weiss, weshalb das Medikament funktioniert.»

Da man nicht weiss, welcher Logik die Maschine folgt, ist das automatische Lernen eine Black Box. Diese Intransparenz ist laut Cristianini insbesondere ausserhalb der akademischen Welt heikel: «Wenn die

Algorithmen den Zugang zu Rechten regeln, zum Beispiel wer an eine Schule aufgenommen wird oder eine Versicherung abschliessen kann oder wer auf Bewährung entlassen wird.»

### Das Ende der Theorie?

Kann diese Art des Lernens noch als Wissenschaft bezeichnet werden? «Man darf sich nichts vormachen», fährt Nello Cristianini fort. «Falls man mit maschinellem Lernen dank korrekter Prognosen Geld machen kann, werden wir wohl schrittweise neu definieren, was wir unter Wissenschaft verstehen. Die Gelder für die Forschung werden in erfolgversprechende praktische Anwendungen fliessen, während es schwierig werden dürfte, andere Ansätze zu finanzieren.» Ist zu befürchten, dass «das Ende der Theorie» kommt, wie es Chris Anderson ausrief? 2008 prophezeite der Verantwortliche des Magazins *Wired*, dass die Datenflut die wissenschaftliche Methode überflüssig machen werde.

«Man muss sich fragen, worin das Ziel von Theorien besteht», antwortet Nello Cristianini. «Für mich ist die Antwort glasklar. Eine schöne Theorie der Mechanik oder der Thermodynamik zu entwickeln, ein Stück unseres Universums zu verstehen – das ist ein unermesslicher kultureller Wert. Wir müssen die Funktionsweise der Welt und von uns selber kennen.» Eine gute Theorie hat einen konkreten Wert. «Eine Black-Box-Prognose reicht nicht aus, wenn viel auf dem Spiel steht, zum Beispiel, wenn eine Sonde auf den Mars geschickt oder eine chirurgische Operation geplant wird. In diesen Fällen will man genau wissen, was passieren würde, wenn man diesen oder jenen Parameter ändert. Dies erfordert kontrafaktische Überlegungen, die nur mit Theorien realisierbar sind.»

Auf der einen Seite probabilistische Maschinen, auf der andern Seite menschliche Wesen, die vom Wunsch geleitet werden, zu verstehen. Die in ihren biologischen Funktionen verwurzelt sind und Theorien

aufstellen. Werden die Maschinen die Menschen ersetzen? «Genau festgelegte Aufgaben können Maschinen übernehmen», bestätigt der Forscher Cristianini. Beispiele? «Ein Protein zeichnen, von dem die Aminosäuresequenz bekannt ist. Ausgehend von einem vollständigen menschlichen Genom mit drei Milliarden Buchstaben die 20 000 Gene finden, aus denen es besteht ... Doch die Bedeutung und Tragweite der Entdeckung zu erkennen wird dem Menschen vorbehalten bleiben.»

In den Sozialwissenschaften ist eine analoge Arbeitsteilung denkbar. Cristianini arbeitet mit Historikern zusammen, um die historischen Transitionen in der englischen und italienischen Geschichte anhand der systematischen Lektüre von Zeitungen zu messen. «Niemand kann 500 Millionen Artikel lesen. Deshalb geht die Maschine sie für uns durch. Weshalb dieses oder jenes Resultat wichtig ist, erklärt dann aber der Historiker.»

Ergänzung: Auch Jürgen Schmidhuber ist von diesem Konzept überzeugt. «In den wissenschaftlichen Laboratorien und anderswo werden Maschinen monotone Arbeiten erledigen, die für Menschen eigentlich unattraktiv sind. Dadurch gehen sicher Arbeitsplätze verloren. Wir werden deshalb als ganze Gesellschaft dafür zu sorgen haben, dass die Gewinne verteilt werden. Dies wird über ein bedingungsloses Grundeinkommen, Robotersteuern oder andere Mechanismen geschehen müssen.» Die durch die Automatisierung der Wissenschaft aufgeworfenen Fragen bleiben ebenso offen wie die epistemologischen. Ist eine automatische Vorhersage wissenschaftliches Wissen? Nello Cristianini stellt sich dieser Herausforderung: «Gerade habe ich zwei Wissenschaftsphilosophen eingestellt, die über diese Frage nachzudenken beginnen.»

Nic Ulmi ist freier Journalist in Genf.





Benjamin ist der erste automatische Drehbuchautor der Welt. Konzipiert wurde er von Ross Goodwin und dem Filmemacher Oscar Sharp. Die Szene aus seinem ersten Film *Sunspring* gibt eine Ahnung davon, wie lang er wohl noch üben wird, bis seine Dialoge und Geschichten auch für menschliche Betrachter Sinn ergeben.

Bild: [thereforefilms.com/sunspring](http://thereforefilms.com/sunspring)

He starts to shake.

H (CONT'D)

It may never be forgiven, but that is just too bad. I have to leave, but I'm not free of the world.

C

Yes. Perhaps I should take it from here. I'm not going to do something.

H

You can't afford to take this anywhere. It's not a dream. But I've got a good time to stay there.

C

Well, I think you can still be back on the table.

H

Mmm. It's a damn thing scared to say. Nothing is going to be a thing but I was the one that got on this rock with a child and then I left the other two.

He is standing in the stars and sitting on the floor.