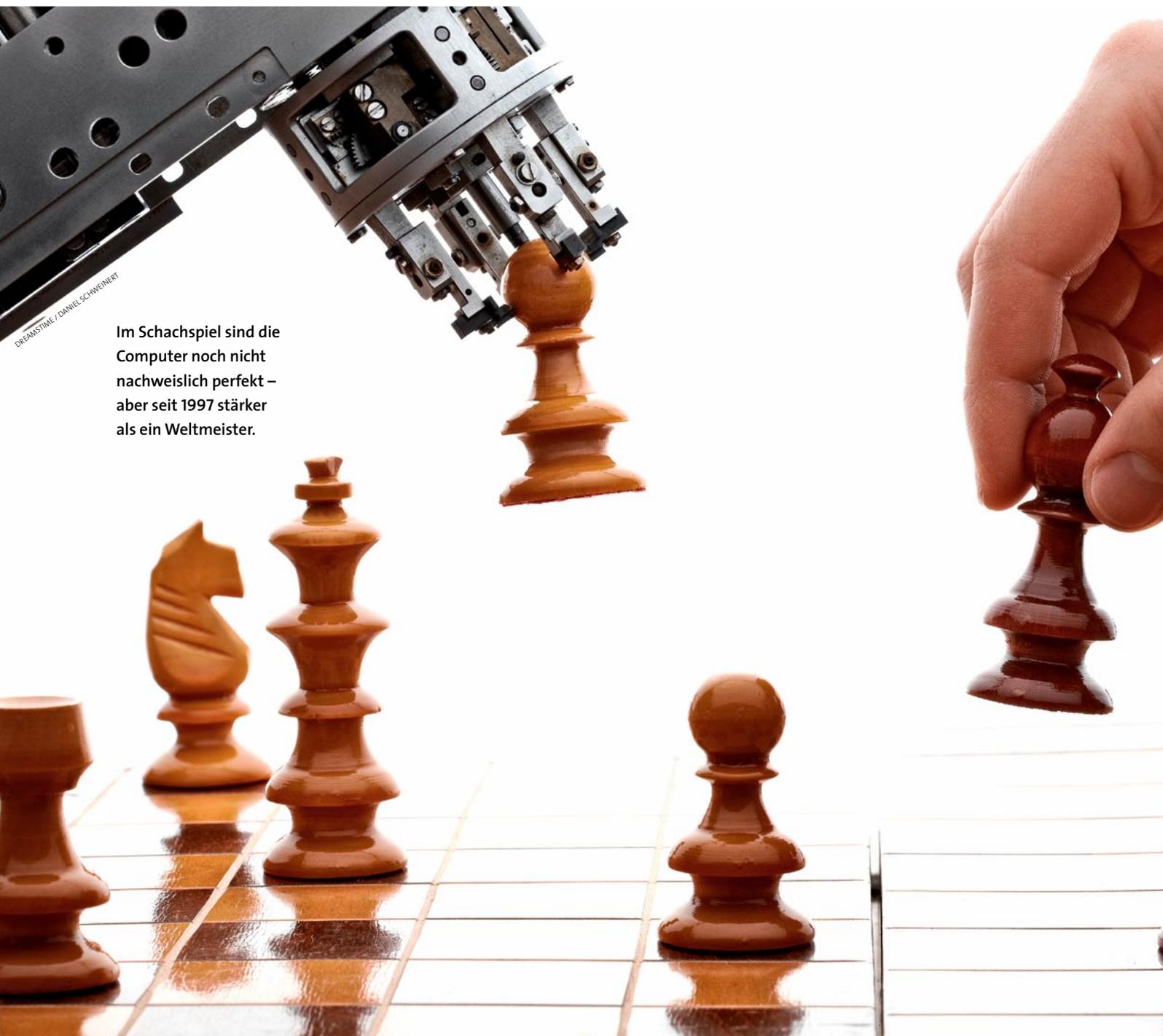


KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

Intelligenz bei Mensch und Maschine

Manche Computer vollbringen zweifellos intelligente Leistungen – aber nur sehr spezielle und stets auf anderem Weg als der Mensch. Ein neuer theoretischer Ansatz zielt darauf ab, diese Kluft zu überbrücken.

Von Jean-Paul Delahaye



DREAMSTONE / DANIEL SCHWEINERT

Im Schachspiel sind die Computer noch nicht nachweislich perfekt – aber seit 1997 stärker als ein Weltmeister.

Was ist Intelligenz? Die Psychologen wissen schon lange, dass dieser zentrale Begriff ihrer Wissenschaft schwer zu fassen ist. Ihr bevorzugtes Mittel zu seiner Messung, der Intelligenztest, fragt nach einer theoretisch schlecht fundierten Mischung von Fähigkeiten. Der amerikanische Psychologe Howard Gardner ging in seinem Buch »Frames of Mind« von 1983 (deutsch: »Abschied vom IQ«) so weit zu behaupten, es gebe nicht eine einheitliche Intelligenz, sondern deren zahlreiche verschiedene. Die Idee schmeichelt unserem Ego, vor allem wenn wir uns nicht einer hohen Punktzahl auf der allgemeinen Intelligenzskala rühmen können: Je mehr Spezialintelligenzen es gibt, desto größer ist unsere Chance, wenig-

tens in einer von ihnen zu glänzen. Gleichwohl stieß Gardners Konzept in der Fachwelt auf heftigen Widerspruch.

Die Diskussion um das Wesen der Intelligenz erhält neue Nahrung, da in jüngster Zeit Maschinen Leistungen vollbringen, die bislang alle Welt ohne zu zögern als intelligent bezeichnet hätte. Als 1997 ein Programm auf dem Rechner »Deep Blue« den damaligen Schachweltmeister Garri Kasparow entthronte, galt das allgemein als epochales Ereignis. Damals wiesen einige Kommentatoren – quasi zum Trost – darauf hin, dass die Programme bei dem Brettspiel Go nur verblüffend mittelmäßige Leistungen zeigten. Aber inzwischen erreichen die Maschinen auch hier die Spielstärke sehr guter Amateure. Im März 2013 schlug das Programm »Crazy Stone« von Rémi Coulom, damals an der Université de Lille, den japanischen Profi Yoshio Ishida; dieser hatte zu Beginn der Partie dem Programm allerdings einen Vorteil von vier Steinen eingeräumt. Nach der japanischen Go-Klassifikation kommt »Crazy Stone« auf eine Spielstärke von »sechs Dan«. Weltweit gibt es weniger als 500 Spieler, die dieses Niveau erreichen. Und im Oktober 2015 gelang es einem von der Firma DeepMind entwickelten System, den amtierenden Go-Europameister zu schlagen (»AlphaGo, der neue Go-Meister«, S. 84).

Im Damespiel ist die künstliche Intelligenz (KI) mittlerweile unfehlbar. Seit 1994 ist es keinem Menschen gelungen, das kanadische Programm »Chinook« zu besiegen; man weiß seit 2007, dass dieses eine optimale, nicht weiter verbesserungsfähige Strategie verfolgt. Nach der Spieltheorie muss es eine solche Gewinnstrategie für alle Spiele dieser Klasse geben. Sie für Schach zu berechnen, scheint allerdings auf mehrere Jahrzehnte hinaus noch unmöglich zu sein.

Der Siegeszug der maschinellen Intelligenz beschränkt sich nicht auf Probleme, die eine klare mathematische Struktur aufweisen oder auf die Durchmusterung einer großen Zahl von Möglichkeiten hinauslaufen. Aber selbst im Bereich der Brettspiele mussten die Forscher erfahren, wie schwierig es ist, menschliche Denkprozesse nachzubilden: Die Programme für Dame, Schach und Go können es zwar mit den besten menschlichen Spielern aufnehmen, funktionieren jedoch ganz anders.

Das ist allerdings kein Anlass, ihnen die Intelligenz abzusprechen. Wenn die Maschinen schon unsere ureigensten Leistungen erbringen, wäre es unfair, auch noch zu verlangen, dass sie das auf unsere Weise tun – vor allem weil wir diese unsere Denkweise nicht einmal genau genug kennen. So ist es noch niemandem gelungen, die Spielweise eines Schachgroßmeisters in Form von Algorithmen zu beschreiben.

Computer am Steuer

Große Mengen von Informationen speichern, schnell und systematisch symbolische Daten wie etwa die Positionen von Bauern auf einem Schachbrett auswerten: Mit diesen Fähigkeiten können Maschinen zwar Schachweltmeister werden, aber noch lange nicht Auto fahren. Gleichwohl



WEGE ZUR UNIVERSELLEN INTELLIGENZ

1 Computer übertreffen Menschen nicht nur beim Zahlenrechnen und Datendurchsuchen, sondern auch beim **Schachspiel**, beim **Autofahren** und in einer **Quizshow**.

2 Sie erbringen diese Leistungen jedoch auf **völlig anderen Wegen** als ein Mensch und können daher auch keinen Aufschluss auf seine Denkweise liefern.

3 Ein neues Konzept setzt Intelligenz mit der Fähigkeit zur **Datenkompression** in Bezug. Dadurch soll die Definition von Eigenheiten des Menschen wie der Maschine unabhängig werden.

haben sie auch hier in letzter Zeit spektakuläre Erfolge vorzuweisen (Spektrum der Wissenschaft 12/2013, S. 88). Auf diesem Gebiet zeigt sich die Diskrepanz in den Vorgehensweisen besonders krass. Ein autonomes Auto »denkt« völlig anders als ein Mensch.

Für das herkömmliche Fahren müsste eine künstliche Intelligenz unterschiedliche und rasch wechselnde Bilder analysieren können: Wo ist der Rand dieser mit Laub bedeckten Straße? Ist der schwarze Fleck 50 Meter vor mir in der Mitte der Straße ein Schlagloch oder eine lumpige Pfütze? Eine so leistungsfähige Bildanalyse kann heute noch niemand programmieren. Daher setzen autonome Fahrzeuge ganz andere Mittel ein. Die Autos der Firma Google (Bild unten) bestimmen ihren Ort auf der Erdoberfläche mit einer hoch präzisen Version des Satellitenortungssystems GPS und verwenden »Karten«, die weit über das hinaus, was in einem Navi gespeichert ist, die Form und das Aussehen der Straßen sowie die Verkehrsschilder und weitere wichtige Orientierungspunkte der Umgebung anzeigen. Obendrein haben sie Radar an Bord, ein optisches System namens Lidar (light detection and ranging), das ein dreidimensionales Abbild der unmittelbaren Umgebung erzeugt, sowie Sensoren an den Rädern.

Da diese Fahrzeuge bereits mehrere zehntausend Kilometer unfallfrei gefahren sind, verfügen sie zweifelsfrei über

Intelligenz, auch wenn sie nicht fähig sind, auf die Zeichen eines Polizisten zu reagieren, gelegentlich vor einer Baustelle in abrupten Stillstand verfallen und aus Sicherheitsgründen nicht schneller als 40 Stundenkilometer fahren dürfen. Hinter einem Menschen am Steuer bleiben sie allerdings noch weit zurück. Der kann dank seiner Fähigkeit, aus Bildern Informationen zu entnehmen, und seiner universellen Intelligenz auch eine völlig unbekannte Strecke bewältigen – ohne Karten, Radar oder Lidar und ohne an einem unerwarteten Hindernis zu scheitern.

Roboter als Journalisten

Geraume Zeit hielt sich die Vorstellung, die – geschriebene oder gesprochene – natürliche Sprache biete Computern ein unüberwindliches Hindernis. Aber auch das ist inzwischen widerlegt. Maschinen erreichen beim Verstehen oder Erzeugen natürlichsprachiger Sätze geradezu beunruhigende Leistungen. So setzen manche Redaktionen, etwa bei der »Los Angeles Times«, bei »Forbes« und Associated Press, Roboterjournalisten ein. Bislang beschränken sich diese Programme darauf, Resultate aus dem Sport oder aus dem Wirtschaftsleben in kurze Artikel zu verwandeln – und stiften damit gelegentlich echten Nutzen.

Am 17. März 2014 gab es um 6.25 Uhr Ortszeit ein Erdbeben der Stärke 4,7 in Kalifornien. Drei Minuten später erschien auf der Internetseite der »Los Angeles Times« ein etwa 20 Zeilen langer Artikel mit Informationen zum Thema: Lage des Epizentrums, Stärke, Zeitpunkt, Vergleich mit Erdstößen aus der jüngeren Vergangenheit. Das verfassende Programm nutzte Rohdaten des Informationsdienstes U.S. Geological Survey Earthquake Notification Service; es stammt von Ken Schwencke, einem Journalisten, der auch programmiert. Nach seiner Aussage vernichten solche Methoden keine Arbeitsplätze, sondern machen im Gegenteil die Arbeit des Journalisten interessanter. In der Tat: Diese Umsetzung zahlenmäßiger Fakten in kurze Texte ist ein ziemlich langweiliger Job – und ein Mensch könnte ihn nicht besser erledigen.

Das autonome Auto der Firma Google verschafft sich einen Panoramablick mit Hilfe von Kameras auf dem Dach – eines von mehreren Mitteln, mit denen es seine im Vergleich zu Menschen schwachen Bildanalysefähigkeiten kompensiert.



GOOGLE

Intelligenztests, bei denen die Maschine gewinnt

Zweifellos sind die klassischen Tests in der Tradition des französischen Psychologen Alfred Binet (1857–1911) kein gutes Mittel, um die Intelligenz von Maschinen zu messen. In der Tat erreichen auch Programme, denen man beim besten Willen keine Intelligenz attestieren kann, darin ziemlich gute Ergebnisse.

So haben Pritika Sanghi und David Dowe 2003 ein Programm geschrieben, das in einer Vielzahl von Tests der unten dargestellten Art annähernd durchschnittliche Punktzahlen erreicht. Die recht einfach gestrickte Software beruht auf einigen Prinzipien, nach denen die Konstrukteure von Tests bevorzugt vorgehen. Ein perfektioniertes Programm würde vermutlich Intelligenzquotienten im Hochbegabtenbereich erzielen. Das beweist jedoch nicht, dass die Programme intelligent wären, sondern nur, dass sich die Tests nicht zur Messung der universellen Intelligenz eignen.

Bei einer bestimmten Art von Aufgaben schneiden die Maschinen übrigens deutlich besser ab als Menschen. Beispiel: Welches sind die nächsten drei Glieder dieser Folge: 3, 4, 6, 8, 12, 14, 18, 20, 24, 30, 32, 38, 42?

Vielleicht erkennen Sie, dass es sich um die Primzahlen plus eins handelt: $2+1, 3+1, 5+1, 7+1, \dots$. Demnach ist die Folge fortzusetzen durch $43+1, 47+1, 53+1$, also 44, 48, 54.

Ein Programm, das derartige Fragen perfekt und in Sekundenschnelle beantwortet, findet sich im Internet: die »Online Encyclopedia of Integer Sequences« (<https://oeis.org>) von Neil Sloane. Sie schlägt auch Antworten vor, auf die Sie nie gekommen wären. Für die oben genannte Folge bietet sie an zweiter Stelle an: Es handelt sich um diejenigen natürlichen Zahlen n mit der Eigenschaft, dass für alle zu n teilerfremden Zahlen k mit $k^2 < n$ die Zahl $n - k^2$ eine Primzahl ist. Nach dieser Logik wären die nächsten Folgenglieder 48, 54, 60. Natürlich würde ein Programm, das darauf ausgelegt ist, einen Intelligenztest zu bestehen, eine solch komplizierte Antwort nicht anbieten.

Das System ist einem Menschen haushoch überlegen. Überzeugen Sie sich selbst, indem Sie versuchen, diese Zahlenfolgen fortzusetzen:

- A. 11, 12, 14, 16, 20, 21, 23, 25, 29
- B. 11, 31, 71, 91, 32, 92, 13, 73
- C. 3, 7, 14, 23, 36, 49
- D. 1, 2, 4, 5, 10, 20, 29, 58, 116
- E. 1, 4, 5, 7, 8, 11, 13, 14, 16, 22, 25, 28, 31, 34

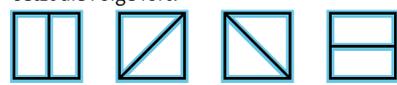
Die Antworten finden Sie am Ende des Kastens. OEIS findet sie augenblicklich, ebenso wie die Antworten auf noch viel

schwierigere Fragen. Dennoch erscheint es nicht vernünftig, dieses Programm als intelligent zu betrachten. Es beschränkt sich darauf, die vorgelegte Folge in einer Datenbank zu suchen, die über Jahre hinweg sorgfältig aufgebaut wurde. Zudem liefert es stets die einfachste Antwort zuerst. Der Erfolg des Programms beruht auf seinem gut gefüllten Speicher und seiner Fähigkeit, diesen schnell und fehlerfrei zu durchsuchen. Ein Mensch dagegen versucht, die Struktur der Folge durch Kopfrechnen und ähnliche Mittel zu entschlüsseln. Abermals beruht der – in diesem Fall spektakuläre – Erfolg des Programms darauf, dass es mit völlig anderen Methoden arbeitet als ein Mensch.

Betrachten Sie die Folge



Welche der folgenden Grafiken setzt die Folge fort?



Vervollständigen Sie die Tabelle

2	4	8
3	6	12
4	8	?

POUR L'ASCIENCE

Vor wenigen Jahren ist es gelungen, einen Computer zu programmieren, der in der Quiz-Fernsehsendung »Jeopardy!« mitspielen kann (Spektrum der Wissenschaft 10/2011, S. 97) – eine Aufgabe, die allem Anschein nach ein umfangreiches kulturelles Allgemeinwissen so-

wie die Beherrschung der natürlichen Sprache erfordert. »Jeopardy!« wurde 1962 erfunden und ist in den USA sehr populär; eine deutsche Version namens »Gefahr!« wurde von 1990 bis 2000 ausgestrahlt. Fragen aus Geografie, Literatur, Kunst, Sport und Naturwissenschaften sind in englischer Umgangssprache formuliert, was auch für die Antworten gelten soll. Bei einigen Phasen des Spiels kommt es auf die Schnelligkeit der Antworten an. Als das von IBM entwickelte Programm »Watson« im Februar 2011 gegen zwei sehr erfolgreiche menschliche Spieler antrat, bekam es die Fragen schriftlich vorgelegt und antwortete mit Hilfe einer künstlichen Stimme. »Watson« trug den Sieg davon und zeigte damit, dass weder die bei »Jeopardy!« üblichen, teilweise weit hergeholtten Wortspiele noch die Breite der unterschiedlichsten Wissensgebiete prinzipielle Hindernisse für die künstliche Intelligenz darstellen.

Heute dient »Watson« dazu, medizinische Expertensysteme zu entwickeln, die in der Ausbildung von Ärzten Verwendung finden.

- A. Alle natürlichen Zahlen ab 10, deren Quersumme eine Primzahl ist (nächste Folgenglieder 30, 32, 34);
- B. Primzahlen ab 10, mit umgekehrter Ziffernfolge notiert (14, 34, 74);
- C. Das n -te Folgenglied ist die Summe von n^2 und der n -ten Primzahl (66, 83, 104);
- D. Teiler von 580 (145, 290, 580);
- E. Diese Zahlen ergeben eine Primzahl, wenn man eine Zwei davor- und eine Eins dahinterschreibt (35, 37, 38).

Ebenfalls vom Computer erzeugt ist eine erstaunlich große Anzahl von Artikeln der freien Enzyklopädie Wikipedia. Der schwedische Physiker Lars Sverker Johansson hat ein Programm namens »Lsjbot« geschrieben, das täglich bis zu 10 000 Einträge produziert und es bislang auf mehr als zwei Millionen Stück gebracht hat, und zwar auf Schwedisch sowie in Cebuano und Wáray-Wáray, zwei auf den Philippinen gesprochenen Sprachen. »Lsjbot« setzt Informationen über Tiere oder Städte, die bereits digitalisiert in Datenbanken vorliegen, in das von Wikipedia vorgegebene Format um. Mitte 2013 waren knapp die Hälfte aller schwedischen Wikipedia-Artikel – im Wortsinn – maschinengeschrieben. Die niederländische Wikipedia wuchs durch computergenerierte Beiträge an Größe sogar über die deutsche hinaus.

Johansson hat für seine Aktion reichlich Lob wie Kritik geerntet. Seinen Artikeln mangle es an Kreativität, und ihre schiere Masse erzeuge ein Ungleichgewicht. Darauf entgegnet er, dass seine Werke – Kreativität hin oder her – gleichwohl nützlich seien, und die durch sie erzeugte Unausgewogenheit sei auch nicht schlimmer als das allgemein beklagte Übergewicht technischer Themen in der Wikipedia. In der Tat erscheint Johanssons Plan, für jede bekannte Tierart einen

Eintrag zu erzeugen, nicht unsinnig. Darüber hinaus plädiert er für eine breite Anwendung seines Programms. Gleichwohl brauche die Wikipedia Redakteure, die literarischer als »Lsjbot« schreiben und insbesondere Gefühle ausdrücken können, »wozu dieses Programm niemals fähig sein wird«.

Viel komplexer und eher der Bezeichnung »künstliche Intelligenz« würdig ist der Erfolg des Programms »Watson« der IBM in der Fernsehspielshow »Jeopardy!« (siehe »Intelligenztests, bei denen die Maschine gewinnt«, S. 81; siehe auch Spektrum der Wissenschaft 4/2011, S. 22, und 10/2011, S. 97).

Heutzutage nehmen es die Programme sogar beim Kreuzworträtsellösen mit den besten menschlichen Fachleuten auf. Man muss sich wohl endgültig von der Vorstellung verabschieden, die Sprache sei dem Menschen vorbehalten, auch wenn die automatische Übersetzung von einer Sprache in die andere zuweilen noch haarsträubenden Unfug liefert.

Einmal den Turing-Test bestehen!

Ebenso wie die Intelligenz entzieht sich der eng verwandte Begriff »Denkvermögen« jedem Versuch einer einfachen Definition. Um den zugehörigen Schwierigkeiten aus dem Weg zu gehen, schlug der Informatik-Pionier Alan Turing (1912–

Der Kompressionswettbewerb von Marcus Hutter

Intelligenz ist – zum Beispiel – das Vermögen, zu einer gegebenen Folge von Daten deren Fortsetzung mit höherer Trefferquote vorherzusagen als durch schlichtes Würfeln. Diese Fähigkeit ist, wie man zeigen kann, äquivalent zu der Fähigkeit, Daten zu komprimieren. Letztere wiederum gilt manchen Forschern, darunter Marcus Hutter, als Intelligenz schlechthin (»universelle Intelligenz«) – vorausgesetzt, die vorgelegten Daten sind hinreichend vielfältig.

Daher hat Hutter einen Wettbewerb in Datenkompression ins Leben gerufen. Jedermann kann sich daran beteiligen und das von Hutter selbst ausgesetzte Preisgeld von 50 000 Euro ganz oder teilweise gewinnen (<http://prize.hutter1.net>).

Die Aufgabe besteht darin, eine Datei mit 100 Millionen Schriftzeichen, die aus der Online-Enzyklopädie Wikipedia zusammengestellt wurde, mit Hilfe eines Programms auf möglichst wenige Zeichen zu komprimieren – verlustfrei wohlge-merkt: Ein mitzulieferndes Dekompressionsprogramm muss die Ausgangsdatei exakt wiederherstellen. Zu Beginn wurde die Datei mit Hilfe eines klassischen Kompressionsprogramms um etwa 81 Prozent auf 18 324 887 Schriftzeichen reduziert. Wer ein Programm einreicht, das die Rate des letzten Gewinners um N Prozent verbessert, erhält $(N/100)$ mal 50 000 Euro. Wenn Sie sich beispielsweise ein Programm ausdenken, das im Vergleich zum vorigen Siegerprogramm eine zusätzliche Kompression von 5 Prozent bringt, gewinnen Sie 2500 Euro. An die Größe des Kompressionsprogramms und an seine Laufzeit werden gewisse Bedingungen gestellt.



FOTOLIA / JÖNG LANTERNE

Diese Kompression reduziert zwar das Volumen erheblich, ist aber irreversibel und daher nicht zugelassen.

Der bislang letzte Sieger Alexander Rhatushnyak erreichte im Mai 2009 eine Kompression auf 15 949 688 Zeichen. Claude Shannon, der Begründer der theoretischen Informatik, schätzte, dass die natürliche Sprache etwa ein Bit Information pro Zeichen trägt. Demnach müsste die genannte Datei mit 12,5 Millionen Zeichen ausdrückbar sein; es gäbe also noch Spielraum – vielleicht sogar etwas mehr, wenn man unterstellt, dass die Wikipedia die Regelmäßigkeit unserer Welt widerspiegelt und ein Programm diese Regelmäßigkeit erfassen könnte.

1954) 1950 den fiktiven Test vor, der heute seinen Namen trägt (Spektrum der Wissenschaft 6/2012, S. 80).

Eine Reihe von Gutachtern führt dabei per Fernschreibleitung – heute wäre stattdessen zu sagen: über das Internet – mit einem unbekanntem System einen schriftlichen Dialog. Wenn die Experten nicht unterscheiden könnten, ob ihr Korrespondenzpartner ein Mensch oder eine Maschine ist, müsste man ihm Denkvermögen oder eben Intelligenz zuschreiben. Schließlich treffen wir das entsprechende Urteil bei einem echten Menschen auch ausschließlich auf Basis der Interaktion mit ihm.

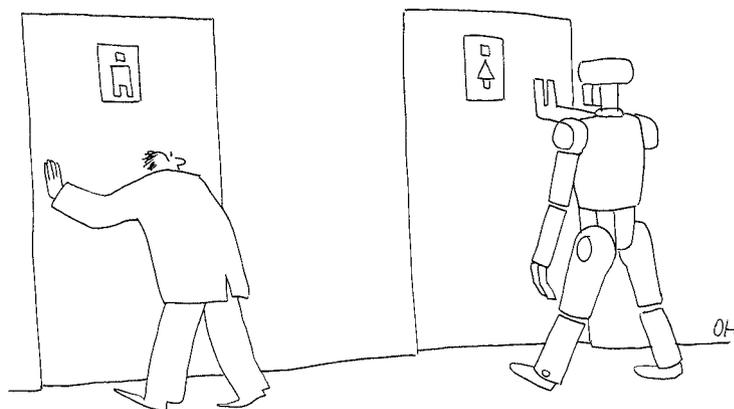
Konkret wäre Turings Gedankenexperiment etwa so zu gestalten: Man versammelt eine große Zahl von Experten und lässt sie so lange, wie sie wollen, mit einem Partner eine schriftliche Korrespondenz führen; dieser ist in der Hälfte der Fälle ein Mensch und in der anderen ein zu testendes informatives System *S*. Zu einem selbst gewählten Zeitpunkt gibt jeder Experte ein Urteil darüber ab, ob er es mit einem Menschen oder einer Maschine zu tun hatte. Ist die Trefferquote aller Experten zusammen nicht besser als der Zufall, also in der Größenordnung von 50 Prozent, so hat das System *S* den Turing-Test bestanden.

Der optimistische Turing sagte voraus, dass die KI bis zum Jahr 2000 einen Teilerfolg erreichen werde. Und zwar würden die Experten nach einem fünfminütigen Dialog in mindestens 30 Prozent der Fälle die Maschine für einen Menschen halten. Im Großen und Ganzen hat Turing Recht behalten: Seit einigen Jahren gibt es Programme, die diese abgeschwächte Form des Tests bestehen. Wann eines im »echten« Turing-Test erfolgreich sein wird, ist derzeit nicht abzusehen. Darüber hat auch Turing nichts gesagt.

Am 6. September 2011 fand im indischen Guwahati ein abgeschwächter Turing-Test mit dem Programm »Cleverbot« des britischen Informatikers Rollo Carpenter statt. 30 Schiedsrichter unterhielten sich vier Minuten lang mit einem unbekanntem Gesprächspartner. Am Ende schätzten die Schiedsrichter und das Publikum, das die Konversation auf Bildschirmen mitverfolgen konnte, mit 59,3 Prozent der 1334 abgegebenen Stimmen die Maschine als Mensch ein (und erkannten nur mit 63,3 Prozent den Menschen als solchen).

Bei einem ähnlichen Test aus Anlass von Turings 60. Todestag am 9. Juni 2014 in der Londoner Royal Society gelang es einem Programm namens »Eugene Goostman«, 10 der 30 versammelten Gutachter in die Irre zu führen (Spektrum der Wissenschaft 5/2015, S. 15). Da die Organisatoren der Veranstaltung eine recht einseitige Darstellung in die Welt setzten, bejubelte die Presse als epochales Ereignis, was eigentlich ein eher bescheidener und zudem mit unfairen Mitteln erreichter Erfolg war: Das Programm gab vor, ein 13-jähriger Junge aus der Ukraine zu sein, und lieferte damit eine plausible Erklärung für sein schlechtes Englisch und sein eingeschränktes Weltwissen, die anderenfalls wohl die Gutachter eher an eine Maschine hätten denken lassen.

Bisher hat kein Algorithmus den Turing-Test bestanden, und es ist auch keiner nur knapp gescheitert. Zudem ist zwei-



felhaft, ob die Methoden, die bei den abgeschwächten Tests erfolgreich waren, beim echten zum Ziel führen. Eine Weile kann ein Programm einen Experten an der Nase herumführen, indem es zu jeder Frage eine Antwort aus einem großen gespeicherten Vorrat auswählt. Da Schiedsrichter immer wieder im Wesentlichen dieselben Fragen zu stellen pflegen, ist die Chance groß, im Speicher eine passende Antwort zu finden. Wenn die Maschine dann noch mit Hilfe eines Programms zur grammatischen Analyse Versatzstücke aus der Frage in die Antwort einbaut, entsteht sogar der Eindruck eines gewissen Verständnisses. Findet sie gar keine passende Replik, kontert sie mit einer Gegenfrage. Einem Journalisten, der »Eugene Goostman« fragte, wie er sich nach seinem Sieg fühle, erwiderte das Programm im Juni 2014: »Was ist das für eine dumme Frage; können Sie mir sagen, wer Sie sind?«

Auf der Suche nach der universellen Intelligenz

Für spezielle Aufgaben – einschließlich einer gewissen Sprachbeherrschung – erreicht heute die künstliche Intelligenz das Leistungsniveau des Menschen oder übertrifft es sogar weit. Das ist in Einzelfällen erstaunlich und ein Erfolg einer regelmäßig fortschreitenden Disziplin. Allerdings wurden diese Fortschritte praktisch nie durch Nachahmung der menschlichen Intelligenz erzielt und tragen zu deren Verständnis dementsprechend auch praktisch nichts bei. Insbesondere kann die Forschungsrichtung noch kein System vorweisen, das über eine wirklich allgemeine oder »universelle« Intelligenz verfügt. Das aber wäre zum Bestehen eines echten Turing-Tests erforderlich.

Was wäre nun eine solche universelle Intelligenz? Auf diese Frage gibt es einige neuere Antwortversuche sehr abstrakter, mathematischer Natur – wohl der beste Weg, um zu einem absoluten, vom Menschen unabhängigen Begriff der Intelligenz zu gelangen.

Eine naheliegende Hypothese lautet: Intelligenz ist die Fähigkeit, Regelmäßigkeiten und Strukturen aller Art zu erfassen oder, in Begriffen der Informatik ausgedrückt, Daten zu komprimieren und zukünftige Ereignisse vorauszusagen. Diese Fähigkeit bietet einen evolutionären Vorteil, denn ihr Träger kann sich die erkannten Regelmäßigkeiten durch entsprechend angepasstes Verhalten zu Nutze machen.

AlphaGo, der neue Go-Meister

Kürzlich haben die Maschinen im Brettspiel offenbar ihre letzte Schwäche überwunden: das fernöstliche Spiel Go. In einem nach den klassischen Regeln gespielten Turnier vom 5. bis zum 9. Oktober 2015 gewann das Programm »AlphaGo« mit 5:0 gegen den dreifachen Go-Europameister Fan Hui (*Nature* 529, S. 445 und 484, 2016). Damit erreichten die Programmierer der Firma Google DeepMind aus London ihr Ziel schätzungsweise zehn Jahre früher als erwartet.

Go ist nicht etwa deswegen schwieriger als Schach, weil die Regeln komplizierter wären – im Gegenteil: Es gibt nur eine Sorte Figuren (»Steine«). Die Parteien Schwarz und Weiß setzen abwechselnd einen Stein ihrer Farbe auf einen der 19·19 Kreuzungspunkte eines regelmäßigen Gitters. Gesetzte Steine werden nicht mehr bewegt, sondern lediglich entfernt, wenn sie von gegnerischen Steinen »umzingelt« sind. Gewonnen hat, wer am Ende den größeren Teil des Spielfelds beherrscht.

Was das Spiel den einfachen Regeln zum Trotz so kompliziert macht, ist die schiere Anzahl der Züge sowie der Möglichkeiten pro Zug. Während ein Schachspieler in jedem Zug durchschnittlich etwa 35 erlaubte Aktionen zur Auswahl hat und kaum ein Spiel länger als 80 Züge dauert, sind die entsprechenden Werte für Go 250 und 150.

Bei schlichter strukturierten Spielen konnten die Programmierer mit roher Gewalt (»brute force«), gepaart mit großer Raffinesse, Erfolge erzielen, indem sie den Computer im Wesentlichen alle zulässigen Spielstellungen durchprobieren ließen. Durch Rückwärtsschließen von den Endstellungen wiesen sie jeder Stellung einen Wert zu: +1, wenn Weiß einen Sieg erzwingen kann, –1 im umgekehrten Fall.

Schon für das Schachspiel ist jedoch diese erschöpfende Durchsuchung des Spielbaums ein Ding der Unmöglichkeit und wird es auf absehbare Zeit bleiben. Stattdessen versucht ein Spielprogramm zu jeder Stellung einen geschätzten Wert zwischen –1 und 1 zu finden: Je größer dieser Wert, desto günstiger ist die Stellung für Weiß. Aus der aktuellen Stellung denkt es eine überschaubare Anzahl von Zügen voraus, findet Bewertungen (die genannten Schätzwerte) für alle so erreichbaren Stellungen und wählt anhand dieser Information seinen nächsten Zug aus (*Spektrum der Wissenschaft* 12/1990, S. 94).

Bereits die Vorläufer von AlphaGo sind davon abgekommen, auch nur jenen Ast des Spielbaums, der von der gegenwärtigen Stellung ausgeht, erschöpfend zu durchsuchen. Vielmehr probieren sie zahlreiche nach dem Zufallsprinzip ausgewählte lange Zugfolgen durch (»Monte Carlo tree search«, MCTS) und wählen dann den Zug aus, der nach Mittelung über alle diese Versuche optimal erscheint.

Mit oder ohne Zufall: Entscheidend für den Erfolg ist das Vorwissen, welches das Spielprogramm mitbringt. Das steckt bei den klassischen Programmen in der Bewertungsfunktion, also dem Algorithmus, der zu einer gegebenen Stellung deren

Schätzwert berechnet. Für die Monte-Carlo-Versionen kommt noch die Strategie hinzu, nach der das Programm die Zufallszugfolgen auswählt. Eine gute Strategie bevorzugt aussichtsreiche Züge, lässt aber denen, die auf den ersten Blick schlecht aussehen, noch eine gewisse Chance.

Neu an der Software der Londoner Spezialisten ist die Methode des Wissenserwerbs. Bisher konstruierten die Programmierer ihre Bewertungsfunktionen, indem sie ihre Maschinen große Datenbanken mit aufgezeichneten Partien durchsuchen ließen und damit Statistiken erstellten. Bei Schach fließen auch noch aus der Literatur bekannte Faustregeln über den Wert gewisser Figuren und Stellungen ein. AlphaGo dagegen erlernt sein Wissen selbst, und zwar mit Hilfe eines tiefen (vielschichtigen) neuronalen Netzes (*Spektrum der Wissenschaft* 9/2014, S. 62). So wie die Schichten eines neuronalen Netzes bei der Bildanalyse quasi automatisch umso größere Teilbereiche eines Bildes erfassen, je höher sie liegen (*Spektrum der Wissenschaft* 12/2015, S. 86), so analysiert das neuronale Netz von AlphaGo eine gegebene Go-Stellung auf verschiedenen Niveaus, ohne explizit darauf programmiert worden zu sein.

In einer ersten Phase lernte das 13-schichtige neuronale Netz an 30 Millionen Spielstellungen aus der Go-Datenbank KGS; in der nächsten verbesserte es dieses Wissen, indem es gegen jeweils ältere Versionen seiner selbst spielte und die Ergebnisse auswertete. In der dritten schließlich lernte es unter Verwendung dieser Vorerfahrungen eine Bewertungsfunktion; diese ging in die Entscheidungen während der Partie ein.

Hat AlphaGo seinen Erfolg auf grundsätzlich anderem Weg erzielt als ein Mensch? Sein Gegner Fan Hui hatte nicht den Eindruck: »Wenn niemand es mir erzählt hätte, dann hätte ich meinen Gegner für einen etwas seltsamen, aber starken Spieler gehalten – und auf jeden Fall für einen echten Menschen.« Mit etwas gutem Willen könnte man diese Art des Lernens, vor allem die zwei Phasen »abschauen beim Meister« und »sich selbst des Stoffs bemächtigen« als menschentypisch ansehen, zumal neuronale Netze in ihrem Aufbau dem menschlichen Gehirn nachempfunden sind.

In einer negativen Eigenschaft gleicht das System allerdings dem Menschen: Es kommt zwar auf Ideen, aber hinterher kann niemand sagen, wie. Die Antwort steckt in den internen Parametern (den »synaptischen Gewichten«) des neuronalen Netzes. Diese sind zwar, im Gegensatz zu entsprechenden Eigenschaften menschlicher Nervenzellen, der Erforschung ohne Weiteres zugänglich, aber eine tiefere Einsicht oder gar eine algorithmische Formulierung lässt sich daraus nicht gewinnen.

Ein Turnier gegen den Koreaner Lee Sedol, der als derzeit stärkster Go-Spieler der Welt gilt, ist für März 2016 geplant.

Christoph Pöppe

Ein Beispiel: Wer in der Zahlenfolge 4, 6, 9, 10, 14, 15, 21, 22, 25, 26, 33, 34, 35, 38, 39, 46, 49, 51, 55, 57 die Struktur »Produkte zweier Primzahlen, nach Größe geordnet« erkennt, kann die Sache nicht nur kürzer ausdrücken, sondern weiß auch, was folgen wird: 58, 62, 65, 69, 74, 77, 82, 85, 86, 87, ...

Der amerikanische Informatiker Ray Solomonoff hat um 1965 diese Beziehung zwischen Intelligenz, Kompression und Voraussage formalisiert. Dabei griff er ein viel zitiertes Prinzip des Philosophen William of Ockham (1288–1347) auf, das heute als »Ockhams Rasiermesser« so formuliert wird: Unter allen mit den Beobachtungen zu vereinbarenden Erklärungen eines Sachverhalts ist die einfachste zu bevorzugen. In Solomonoffs Version ist die »einfachste« die am stärksten komprimierte, das heißt diejenige mit dem kleinsten Verhältnis zwischen Erklärung und erklärten Daten.

Wenn man diese beiden Größen – Menge der Daten und Umfang der Erklärung – auf vernünftige Weise zahlenmäßig ausdrücken kann, wird aus der letzten Version ein mathematisches Kriterium. Genau das leistet die algorithmische Theorie der Information, die auf Andrej Kolmogorow und Gregory Chaitin zurückgeht (Spektrum der Wissenschaft 11/2012, S. 82, und 2/2004, S. 86). Nach ihr ist die Komplexität einer beliebigen Zeichenkette (insbesondere einer vollständig beschriebenen Theorie) gleich der Länge des kürzesten Programms, das zur Erzeugung derselben fähig ist.

Auf der Basis dieses Komplexitätsbegriffs gab schließlich der deutsche Informatiker Marcus Hutter, der inzwischen an der Australian National University lehrt, eine Definition der »universellen Intelligenz«. Und zwar ist sie zu messen als »der Erfolg einer Strategie, gemittelt über alle vorstellbaren Umwelten«. Die zunächst wenig aufschlussreiche Formulierung wird dadurch interessant, dass sich alle in ihr vorkommenden Begriffe im Sinn der Informatik interpretieren lassen: »Strategie« ist ein beliebig leistungsfähiges Stück Software, »Umwelt« alle Daten, mit denen sie konfrontiert werden könnte – unter der relativ schwachen Voraussetzung, dass diese Daten nicht vollkommen willkürlich sind, sondern gewissen Gesetzmäßigkeiten gehorchen, so wie unsere natürliche Umwelt den Gesetzen der Physik unterliegt. »Erfolg« schließlich ist zu verstehen als Maximierung einer sinnvoll definierten Zielfunktion, die typischerweise das eigene Überleben und die Erzeugung zahlreicher Nachkommen umfasst.

Hutter präzisiert seine Definition noch durch etliche technische Details, die hier nicht wiedergegeben werden können. Auch damit bleibt jedoch sein Konzept zu abstrakt, um unmittelbar anwendbar zu sein: Noch ist die Vorstellung, man könne die universelle Intelligenz eines KI-Systems durch einen Test bestimmen, fern jeder Realität. Gleichwohl eignet sich der Begriff zum Aufbau einer mathematischen Theorie, die nicht mehr von den Eigenheiten der menschlichen Intelligenz abhängt. Im Gegensatz zu den eingangs erwähnten multiplen Intelligenzen von Howard Gardner wäre somit Intelligenz ein einheitliches Konzept, und an die Stelle der gängigen, von Willkür geprägten Intelligenztests könnte eine

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema »künstliche Intelligenz« finden Sie unter



www.spektrum.de/t/kuenstliche-intelligenz



DREAMSTIME / MARCIN ZERKOWSKI

Klassifikation treten, die jedem lebenden oder mechanischen Wesen in sinnvoller Weise ein Maß an Intelligenz zuschreiben würde.

Ihrer gegenwärtigen Realitätsferne zum Trotz stellt diese Theorie einen bedeutenden Fortschritt dar. Mittlerweile hat die »universelle künstliche Intelligenz« den Rang eines eigenen Forschungsgebiets und eine eigene Fachzeitschrift, das frei zugängliche »Journal of Artificial General Intelligence«.

Zweifelloos um zu verhindern, dass sich die Disziplin mit der Entwicklung ihres mathematischen Teils zufriedengibt, hat Marcus Hutter einen Informatikwettbewerb ins Leben gerufen. Er beruht auf der Idee, dass man umso intelligenter ist, je stärker man Daten zu komprimieren vermag. Wer gewinnen und einen Teil des Preisgelds von 50 000 Euro einstreichen will, muss gewisse Inhalte der Wikipedia möglichst gut komprimieren, wobei diese als eine Art Miniaturabbild des Reichtums unserer Welt gilt (siehe »Der Kompressionswettbewerb von Marcus Hutter«, S. 82).

Vielleicht wird die neue Disziplin den Forschern dabei helfen, die universelle Intelligenz zu realisieren, die unseren aktuellen Maschinen so offensichtlich fehlt. ~

DER AUTOR



Jean-Paul Delahaye ist emeritierter Professor am Institut für Grundlagen der Informatik der Universität de Lille.

QUELLEN

Dowe, D., Hernández-Orellano, J.: How Universal can an Intelligence Test Be. In: Adaptive Behavior 22, S. 51–69, 2014

Goertzel, B.: Artificial General Intelligence: Concept, State of the Art, and Future Prospects. In: Journal of Artificial General Intelligence 5, S. 1–48, 2014

Hutter, M.: Universal Artificial Intelligence: Sequential Decisions Based on Algorithmic Probability. Springer, Heidelberg 2005

Hutter, M.: 50 000 Euros Prize for Compressing Human Knowledge. <http://prize.hutter1.net>

Tesaro, G. et al.: Analysis of Watson's Strategies for Playing Jeopardy! <http://arxiv.org/abs/1402.0571>

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1396798