

Ein praxistauglicher Haushaltsroboter muss drei grundlegende Fähigkeiten besitzen: Wahrnehmung, Mobilität und Geschicklichkeit. Davon stellt die Geschicklichkeit die größte Herausforderung dar. Stefanie Tellex, Robotikprofessorin an der Brown University, erklärt: »Die meisten Roboter können die meisten Gegenstände meistens nicht aufheben.« Das liegt am Tastsinn, die Fertigung (geschickte Hände sind extrem teuer) und an den Algorithmen: Wir wissen zu wenig darüber, wie wir die Wahrnehmung mit der Steuerung so kombinieren können, dass der Roboter die vielen verschiedenen Gegenstände, die es in einem normalen Haushalt gibt, greifen und manipulieren kann. Allein für harte (unelastische) Objekte gibt es Dutzende von Greifarten. Wenn dann noch die Manipulation (also Handhabung) dazukommt, gibt es Tausende von Möglichkeiten: Schüttele genau zwei Tabletten aus der Dose, löse das Etikett vom Marmeladenglas, streiche harte Butter auf ein weiches Brot, hole eine Nudel mit einer Gabel aus dem Topf, um zu prüfen, ob die Pasta fertig ist.

Vermutlich werden wir die Probleme mit dem Tastsinn und der Handkonstruktion dank 3D-Druck in den Griff bekommen. Boston Dynamics setzt die Technologie bereits für die komplexeren Bauteile des humanoiden Roboters Atlas ein. Roboter werden immer besser beim Manipulieren von Dingen, was zum Teil auf das tiefe Reinforcement Learning zurückgeht.²⁰ Der letzte Schritt, in dem alle diese Komponenten zu einer Konstruktion kombiniert werden, die den erstaunlichen Fähigkeiten der Roboter aus Kinofilmen nahekommt, dürfte wohl ganz unromantisch aus der Warenhausindustrie kommen. Allein Amazon beschäftigt einige Hunderttausend Mitarbeiter, die in riesigen Lagern Produkte aus Fächern nehmen und für den Versand an Kunden verpacken. In den Jahren 2015 bis 2017 veranstaltete Amazon eine jährliche »Picking Challenge«, um die Entwicklung von Robotern für diese Aufgabe zu beschleunigen.²¹ Das Ziel ist noch nicht ganz erreicht, aber sobald die wesentlichen Forschungshindernisse überwunden sind – voraussichtlich innerhalb von zehn Jahren –, dürfen solche Roboter sehr schnell Einzug in die Lagerhäuser und Logistikzentren dieser Welt halten. Von dort werden sie sich auf andere kommerzielle Anwendungen ausbreiten, zum Beispiel in der Landwirtschaft und im Bauwesen, denn diese Branchen halten eine Reihe von gut vorhersagbaren Aufgaben und Gegenständen bereit.

Vielleicht begegnen wir ihnen auch im Einzelhandel, wo sie Regal auffüllen oder Kleidung falten.

Im privaten Umfeld werden vermutlich ältere und gebrechliche Personen als Erstes von Robotern profitieren, die ihnen mehr Unabhängigkeit ermöglichen. Selbst Roboter, die nur wenige Aufgaben übernehmen oder nur ein beschränktes Verständnis der Lage haben, können extrem nützlich sein. Wenn Sie sich jetzt schon auf Ihren Roboter-Butler freuen, der den gesamten Haushalt souverän im Griff hat und Ihnen jeden Wunsch von den Augen abliest, muss ich Sie aber leider enttäuschen: Für einen solchen Helfer müssen wir einer dem Menschen ebenbürtigen KI sehr viel näher kommen, und das dürfte noch eine ganze Weile dauern.

Intelligenz in globalem Maßstab

Die Entwicklung grundlegender Fähigkeiten zum Sprach- und Textverständnis ermöglicht es intelligenten persönlichen Assistenten, Dinge zu tun, die derzeit von Menschen erledigt werden. Der Unterschied besteht darin, dass die Maschinen diese Aufgabe für Centbeträge pro Monat erledigen, die menschliche Arbeitskraft dagegen mehrere Tausend Euro pro Monat kostet. Ein grundlegendes Sprach- und Textverständnis ermöglicht den Maschinen aber auch, Aufgaben zu übernehmen, die Menschen nicht bewältigen können. Dabei liegt dies weniger daran, dass uns Menschen das *tiefer* Verständnis fehlt, sondern vielmehr daran, dass die Datenmenge zu *gering* ist. Ein Beispiel: Eine Maschine mit grundlegenden Lesefähigkeiten kann an einem Vormittag alle jemals von der Menschheit verfassten Schriften lesen und sich dann nach einer neuen Aufgabe umsehen.²² Wenn sie über eine Spracherkennung verfügt, könnte sie sich vor dem späten Nachmittag noch alle Radio- und Fernsehübertragungen anhören und ansehen. Zum Vergleich: Es wären 200.000 Menschen in Vollzeitanstellung nötig, um mit den laufenden gedruckten Veröffentlichungen Schritt zu halten (und dann blieben alle älteren Texte links liegen). Weitere 60.000 müssten für das Konsumieren der aktuellen Rundfunk- und Fernsehausstrahlungen abgestellt werden.²³

Wenn unser KI-System dann noch einfache Sachverhalte extrahieren und all diese Informationen aus allen Sprachen der Welt integrieren könnte, wäre es eine unglaubliche Ressource zum Finden von

verschlüsselten Daten arbeiten. Dazu werden sichere Mehrparteienberechnungen (SMC) eingesetzt, bei denen Nutzerdaten gepoolt werden, ohne dass Privatsphäre oder Datenschutz darunter leiden.¹⁴ Werden Softwareanbieter solche Technologien zum Datenschutz freiwillig verwenden, wenn sie nicht per Gesetz dazu gezwungen werden? Nun, das wird sich zeigen. In jedem Fall erscheint es sicher, dass Nutzer einem persönlichen Assistenten nur trauen werden, wenn in erster Linie sie selbst davon profitieren und nicht der Hersteller.

Smart Homes und Haushaltsroboter

Das Smart-Home-Konzept ist schon seit Jahrzehnten ein Thema. 1966 sammelte James Sutherland, ein Ingenieur bei Westinghouse, überschüssige Computerteile und baute daraus ECHO, die erste Steuerung für das smarte Zuhause.¹⁵ Unglücklicherweise wog ECHO über 360 Kilogramm, verbrauchte 3,5 Kilowatt und konnte lediglich drei Digitaluhren und die Fernsehantenne verwalten. Spätere Systeme setzten die Beherrschung extrem komplexer Bedienoberflächen voraus. Kein Wunder, dass sie sich nicht durchsetzen konnten.

Ab den 1990er-Jahren versuchten sich mehrere ambitionierte Projekte daran, Häuser zu entwerfen, die sich fast ohne menschliche Eingriffe selbst steuern und den Lebensstil der Bewohner mittels Machine Learning erlernen sollten. Das ließ sich natürlich nur testen, wenn auch wirklich jemand in diesen Häusern lebte. Leider trafen die Systeme so viele falsche Entscheidungen, dass sie sich als nutzlos erwiesen und die Lebensqualität der Bewohner sogar verschlechterten. Zum Beispiel saßen die Bewohner des Projekts MavHome¹⁶ der Washington State University im Jahr 2003 häufig im Dunkeln, wenn Besucher noch zu einer Zeit da waren, zu der normalerweise alle im Bett lagen.¹⁷ Wie beim eher nicht intelligenten persönlichen Assistenten resultieren solche Fehlschläge aus mangelndem Zugriff auf Sensoren, die anzeigen, was die Bewohner gerade tun, sowie auf der Unfähigkeit, die Geschehnisse im Haus zu verfolgen und zu verstehen.

Ein wirklich smartes Zuhause muss mit Kameras und Mikrofonen und natürlich den erforderlichen Wahrnehmungs- und Schlussfolgerungsfertigkeiten ausgestattet sein, damit es versteht, was die Bewohner tun: Besuch empfangen, essen, schlafen, fernsehen, lesen, trainieren, eine längere Reise vorbereiten oder nach einem Sturz hilflos auf dem Boden liegen. Durch Abstimmung mit dem intelligenten

persönlichen Assistenten ist das Smart Home dann recht gut darüber informiert, wer zu welcher Zeit anwesend ist, wer wo isst und so weiter. Dieses Verständnis wird für eine intelligente Steuerung von Heizung, Beleuchtung, Rollläden und Sicherheitssystemen, für rechtzeitige Erinnerungen und für Benachrichtigungen der Bewohner oder Rettungsdienste bei Problemen oder Gefahren benötigt. Einige neu errichtete Apartmenthäuser in den Vereinigten Staaten und in Japan verfügen bereits über entsprechende Technologien.¹⁸

Der limitierende Faktor bei den Smart Homes sind die Aktoren. Viel einfachere Systeme, etwa Thermostate mit Zeiteinstellung, Leuchten mit Bewegungssensor und Alarmsysteme, können einen Großteil der Smart-Home-Funktionen auf besser vorsehbarer, wenn auch weniger kontextsensitiver Weise erfüllen. Ein Smart Home kann keine Wäsche falten, kein Geschirr abspülen und die Post nicht hereinholen. Was ihm also wirklich fehlt, ist ein Roboter, der seine Anweisungen ausführt.

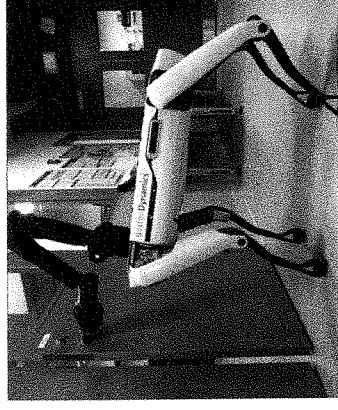
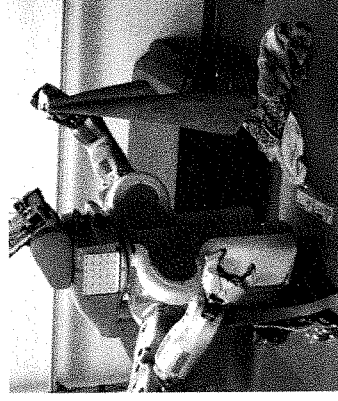


Abb. 3.1: Links: BREETT faltet Handtücher, rechts: SpotMini von Boston Dynamics öffnet eine Tür.

Vielleicht ist es bald so weit. Schon heute verfügen Roboter über viele der benötigten Fertigkeiten. In Berkeley hat mein Kollege Pieter Abbeel einen Roboter namens BREETT entwickelt (das Akronym steht für »Berkeley Robot for the Elimination of Tedious Tasks«, etwa Berkeley-Roboter zur Erledigung lästiger Aufgaben), der schon seit 2011 Handtuchstapel faltet. Und SpotMini von Boston Dynamics kann Treppen steigen und Türen öffnen (siehe Abbildung 3.1). Mehrere Unternehmen stellen bereits Kochroboter her. Diese funktionieren allerdings nur in kontrollierten Umgebungen mit vorgeschnittenen Zutaten, sind also noch nicht für Privathaushalte geeignet.¹⁹

Modellierung des gesunden Menschenverstands (abgesehen vielleicht von Verschlusssachen, die sich mit der Analyse von Geheimdienstmaterial und militärischer Planung befassen), da die Kosten hoch sind und der Nutzen ungewiss. Mittlerweile könnten die Ergebnisse aber für Hunderte von Millionen Menschen interessant sein. Das senkt das Investitionsrisiko und bietet einen sehr viel höheren potenziellen Nutzen. Außerdem kann ein intelligenter Assistent, der Zugriff auf so viele Nutzer hat, sehr schnell lernen und die Lücken in seinem Wissensschatz füllen.

Wir können durchaus mit intelligenten Assistenten rechnen, die uns für Centbeträge im Monat bei vielen Alltagsaufgaben unterstützen: Termine, Reisepläne, Wocheneinkäufe, fällige Rechnungen, Hausaufgaben der Kinder, Erinnerungen, Essenspläne, Vorsortieren und Filtern von E-Mails oder Anrufen und vielleicht sogar – man erlaube mir, zu träumen – Finden meiner Schlüssel. All diese Funktionen werden nicht über unzählige Apps verstreut, sondern Bestandteile eines zentralen integrierten Agenten sein, der die Synergien des »großen Ganzen« nutzt.

Die allgemeine Blaupause für einen intelligenten Assistenten enthält bereits Hintergrundwissen über menschliches Handeln, die Fähigkeit, Informationen aus Wahrnehmungs- und Textdatenströmen herauszufiltern, und einen Lernprozess, um sich an die Umstände des jeweiligen Nutzers anzupassen. Diese Blaupause lässt sich auch auf mindestens drei andere wichtige Bereiche anwenden: Gesundheit, Bildung und Finanzen. Hier muss das System ganz grob gesagt den körperlichen oder geistigen Zustand bzw. den Zustand des Bankkontos im Blick behalten. Wie bei den Alltagsassistenten amortisieren sich die Vorlaufkosten für das Zusammentragen des erforderlichen Grundwissens auf jedem dieser Gebiete über viele Milliarden Nutzer.

Beispiel Gesundheit: Wir verfügen alle über eine mehr oder weniger identische Physiologie, deren Funktion bereits umfassend erforscht und in maschinenlesbarer Form erfasst wurde.¹¹ Systeme passen sich an Ihre persönlichen Merkmale und Lebensumstände an, machen Vorschläge zur Vorbeugung von Problemen oder geben Warnungen dazu ab.

Im Bereich der Bildung wurden die Vorteile intelligenter Tutoriensysteme bereits in den 1960ern erkannt,¹² aber echte Fortschritte lassen nach wie vor auf sich warten. Das liegt hauptsächlich an fehlenden

Inhalten und Problemen beim Zugang: Die meisten Tutoriensysteme verstehen die Inhalte dessen, was sie lehren sollen, nicht und können auch keinen Text- oder Sprachdialog mit den Schülern oder Studenten führen. (Das wäre in etwa so, als würde ich jemanden auf Laotisch in Stringtheorie unterrichten – beides Dinge, von denen ich kein Wort verstehe.) Dank der Fortschritte bei der Spracherkennung können automatisierte Tutoren heute zumindest Personen mit Leseschwäche helfen. Auch kann die Technologie für probabilistisches Schließen mittlerweile Buch darüber führen, was die Studenten wissen und was nicht¹³ und auf diese Weise den Lernstoff so dosieren, dass ein maximaler Lernerfolg möglich ist. Der 2014 gestartete Global Learning XPRIZE lobte 15 Millionen US-Dollar für eine »skalierbare Open-Source-Software aus, die Kindern in Entwicklungsländern ermöglicht, sich selbst innerhalb von 15 Monaten grundlegende Lese-, Schreib- und Rechenfertigkeiten beizubringen«. Berichte der Preisträger KitKit School und onebillion deuten darauf hin, dass dieses Ziel weitgehend erreicht wurde.

Auf dem Gebiet der persönlichen Finanzen überwachen solche Systeme Investitionen, das Einkommen, erforderliche und andere Ausgaben, Schulden, Zinszahlungen, Rücklagen usw. – ähnlich einem Finanzanalysten, der die Finanzen und deren Entwicklung für Konzerne im Blick behält. Eine Verzahnung eines solchen Agenten mit dem Alltagsassistenten ermöglichte noch detailliertere Einsichten. Dann wäre es zum Beispiel möglich, den Kindern ihr Taschengeld pünktlich zu zahlen und dabei gleich Beträge für freches Betragen abzuziehen. So könnte man eine tägliche Finanzberatung bekommen, wie sie bislang den Superreichen vorbehalten ist.

Haben Ihre Alarmglocken beim Lesen der letzten Absätze geschellt? Falls nicht, haben Sie vermutlich nichts von den jüngsten Datenschutzskandalen mitbekommen. Natürlich gibt es zwei Seiten der Medaille. Kann ein persönlicher Assistent Sie wirklich unterstützen, wenn er nichts über Sie weiß? Vermutlich nicht. Können persönliche Assistenten wirklich nützlich sein, wenn sie keine Daten von mehreren Nutzern verarbeiten dürfen, um mehr über das menschliche Verhalten im Allgemeinen und das Verhalten von Menschen, die Ihnen ähnlich sind, zu erfahren? Vermutlich nicht. Bedeutet das nun, dass wir unsere Privatsphäre aufgeben müssen, damit wir im Alltag von einer KI profitieren können? Nein, denn Lernalgorithmen können mit

keitsverkehrsmittels brächten, das große Zentren miteinander verbindet.⁷ Bei Kosten von weniger als zwei Cent pro Fahrgastkilometer ist zu erwarten, dass die meisten Städte diese Dienstleistung kostenlos anbieten und die Passagiere dafür mit jeder Menge Werbung malträtieren.

Diese Vorteile gibt es natürlich nur dann, wenn die Industrie auch die Risiken beachtet. Falls zu viele Menschen durch unzureichend entwickelte Testfahrzeuge sterben, werden die Aufsichtsbehörden geplante Entwicklungen vielleicht stoppen oder extrem hohe Standards festlegen, die auf Jahrzehnte hinaus nicht erreicht werden können.⁸ Ganz abgesehen davon wird natürlich niemand ein autonomes Fahrzeug kaufen oder sich davon chauffieren lassen, wenn die Fahrt damit nicht nachweislich sicher ist. Eine Umfrage aus dem Jahr 2018 zeigte gegenüber dem Jahr 2019 bei Verbrauchern eine Abnahme des Vertrauens in autonome Fahrzeugtechnologie.⁹ Wenn die Technik Erfolg hätte, würde eine zunehmende Autonomie allerdings gewisse Nachteile mit sich bringen: Die menschlichen Fahrkünste würden sich verschlechtern. Vielleicht könnte irgendwann niemand mehr ein Auto steuern oder die rücksichtslose und unsoziale Betätigung, selbst Auto zu fahren, könnte ganz verboten werden.

Intelligente persönliche Assistenten

Die meisten meiner Leser dürften schon Kontakt zu weniger intelligenten persönlichen Assistenten in Form von smarten Lautsprechern oder Smartphone-Assistenten gehabt haben. Oft verstehen sie uns nicht richtig oder verwechseln Wörter, sodass sie nicht tun, was wir wollen. Letztendlich handelt es sich bei diesen Assistenten um eine sprachgesteuerte Schnittstelle zu Apps und Suchmaschinen, die mit vorgefertigten Reiz-Reaktion-Mustern arbeiten, wie es schon bei Eliza aus den 1960ern der Fall war.¹⁰

Diese Systeme haben drei Schwächen, nämlich Zugang, Inhalt und Kontext. *Zugangsschwächen* bestehen in einem Mangel an Sensordaten. Die Systeme wissen nicht, was geschieht. Ein einfaches Beispiel: Der Assistent hört, was der Nutzer sagt, sieht aber nicht, zu wem er sagt. *Inhaltsschwächen* bedeuten, dass die Absicht oder Botschaft des Gesagten (oder Getippten) nicht verstanden wird, obwohl der Wortlaut zur Verfügung steht. *Kontextschwächen* treten auf, weil die Assistenten die Ziele, Gewohnheiten und Beziehungen, die im täglichen Leben eine

wichtige Rolle spielen, nicht kennen oder nicht in ihre Aktionen einbeziehen.

Trotz dieser Schwächen sind Sprach- und Smartphone-Assistenten für Millionen von Menschen gut genug, um sie in den eigenen vier Wänden zu nutzen oder immer in der Hosen- oder Jackentasche zu haben. Sie sind, wenn man so will, die Trojanischen Pferde der KI. Sie sind so omnipräsent, dass jede noch so winzige Verbesserung ihrer Fähigkeiten viele Milliarden US-Dollar wert ist.

Und so werden uns immer mehr Verbesserungen immer schneller präsentiert. Die wohl wichtigste davon ist die elementare Fähigkeit, den Inhalt zu begreifen. Der Assistent würde dann wissen, dass die Aussage »John ist im Krankenhaus« keine Aufforderung ist, mit »Ich hoffe, es ist nichts Ernstes« zu antworten, sondern vielmehr nützliche Informationen enthält: Der achtjährige Sohn des Sprechers liegt in einem Krankenhaus in der Nähe und ist vielleicht schwer verletzt oder krank. Der Zugang zu E-Mails und SMS sowie Telefonaten und Gesprächen im Haushalt (die vom smarten Lautsprecher aufgenommen werden) würde KI-Systemen genug Informationen liefern, um ein recht vollständiges Bild vom Leben des Nutzers zu erstellen. Möglicherweise wüssten sie mehr als der Butler einer aristokratischen Familie aus dem 19. Jahrhundert oder der persönliche Assistent eines Konzernchefs.

Natürlich reichen unverarbeitete Daten nicht aus. Damit ein Assistent wirklich nützlich sein kann, muss er ein allgemeines Verständnis dafür haben, wie die Welt funktioniert: Ein Kind, das im Krankenhaus ist, kann nicht gleichzeitig zu Hause sein. Ein Krankenhausaufenthalt wegen eines gebrochenen Arms dauert nur selten länger als einen oder zwei Tage. Die Schule des Kindes muss über sein Fernbleiben vom Unterricht informiert werden. Und so weiter. Mit diesem Wissen kann der Assistent die Dinge im Blick behalten, die er nicht direkt beobachten kann. Das ist eine grundlegende Fertigkeit intelligenter Systeme.

Die im vorherigen Absatz genannten Fähigkeiten müssten meiner Meinung nach mit der heutigen Technologie für probabilistisches Schließen zu erzielen sein (siehe Anhang C). Das bedarf allerdings erheblicher Anstrengungen beim Erstellen von Modellen für alle möglichen Ereignisse und Transaktionen, die unser tägliches Leben ausmachen. Bisher gibt es noch keine umfassenden Projekte zur

Bereichen Fertigung, Distribution und Handel. Diese versorgen KI-Systeme mit Massen von neuen Sensordaten und Steuerungsmöglichkeiten.

Weitere Verbesserungen bei der Wahrnehmung ermöglichen es KI-gesteuerten Robotern schließlich, die kontrollierten Fabrikumgebungen zu verlassen, in denen alles seinen festen Platz hat, und unsere echte, unstrukturierte und chaotische Welt zu betreten, in der ihre Kameras viele interessante Dinge zu entdecken haben.

Selbstfahrende Autos

Gegen Ende der 1950er-Jahre träumte John McCarthy davon, sich eines Tages von einem autonomen Fahrzeug zum Flughafen bringen zu lassen. 1987 stellte Ernst Dickmanns einen selbstfahrenden Mercedes-Transporter vor: Das Fahrzeug konnte auf einer deutschen Autobahn die Spur halten, einem anderen Auto folgen, die Spur wechseln und überholen.³ Mehr als 30 Jahre später haben wir zwar noch keine vollständige Autonomie erreicht, aber wir sind ihr ein gutes Stück näher gekommen. Die größten Entwicklungsanstrengungen werden schon lange nicht mehr in akademischen Forschungseinrichtungen unternommen, sondern in großen Konzernen. 2019 haben die besten Testfahrzeuge viele Millionen Kilometer auf öffentlichen Straßen und Milliarden von Kilometern in Fahrsimulationen ohne schwere Unfälle zurückgelegt.⁴ Doch unglücklicherweise haben andere autonome und teilautonome Fahrzeuge mehrere Menschenleben gekostet.⁵

Was ist so kompliziert an der Entwicklung von Algorithmen für sicheres autonomes Fahren? Das erste Problem besteht in den anspruchsvollen Voraussetzungen. In den Vereinigten Staaten stirbt pro 100 Millionen von menschlichen Fahrern zurückgelegten Meilen (etwa 1,6 Millionen Kilometer) etwa eine Person – die Messlatte liegt also hoch: Autonome Fahrzeuge werden nur akzeptiert, wenn sie deutlich besser abschneiden und diesen Wert zum Beispiel auf ein Zehntel reduzieren (also ein Verkehrstoter pro 1,6 Milliarden Kilometer, was etwa einer Fahrleistung von 40 Wochenstunden über einen Zeitraum von 25.000 Jahren entspricht). Das zweite Problem ist, dass ein angedachter Sicherheitsmechanismus – nämlich die Übergabe der Kontrolle an den Menschen, wenn das Fahrzeug verwirrt ist oder die sicheren Betriebsbedingungen nicht mehr gegeben sind – einfach nicht funktioniert. In einem autonomen Auto schenken Menschen

dem Verkehrsgeschehen sehr schnell nicht mehr ihre volle Aufmerksamkeit und können die Situation daher im Gefahrenfall nicht schnell genug erfassen. Außerdem haben Beifahrer oder Personen auf dem Rücksitz (zum Beispiel in einem Taxi) auch gar keine Möglichkeit, das Steuer zu übernehmen, wenn etwas Unvorhergesehenes passiert.

Aktuelle Projekte streben einen SAE-Autonomiegrad der Stufe 4 an.⁶ Diese Stufe ist erreicht, wenn das Fahrzeug jederzeit (abhängig von Hindernissen und Wetterbedingungen) in der Lage ist, eigenständig zu fahren oder sicher anzuhalten. Da sich die Wetter- und Verkehrsverhältnisse ändern und ungewöhnliche Situationen auftreten können, für die ein Fahrzeug der Stufe 4 keine Lösung kennt, muss ein menschlicher Fahrer vorhanden sein, um bei Bedarf die Kontrolle zu übernehmen. (Stufe 5 bezeichnet die uneingeschränkte Autonomie, bei der kein menschlicher Fahrer anwesend sein muss. Das ist noch schwieriger zu erreichen.) Sie haben es sicherlich erkannt: Autonomiegrad 4 benötigt mehr als Reflexhandlungen wie das Beachten der weißen Linien und das Umfahren von Hindernissen. Das Fahrzeug muss anhand der aktuellen und bisherigen Beobachtungen die Absichten und möglichen künftigen Bewegungslinien aller relevanten Objekte beurteilen. Das umfasst auch Objekte, die vielleicht gerade nicht sichtbar sind. Auf Basis einer Lookahead-Suche muss es sich dann für einen Weg entscheiden, der Sicherheit und Fortkommen zugleich berücksichtigt. Einige Projekte setzen auf direktere Ansätze mittels Reinforcement Learning (natürlich hauptsächlich in der Simulation) und überwachtes Lernen anhand von Aufzeichnungen einiger Hundert menschlicher Fahrer, aber damit dürfte das geforderte Sicherheitsniveau kaum zu erreichen sein.

Die Menschheit könnte von vollautonomen Fahrzeugen extrem profitieren. Jedes Jahr sterben weltweit 1,2 Millionen Menschen bei Autounfällen. Und ein paar Dutzend Millionen erleiden schwere Verletzungen. Ein vernünftiges Ziel für autonome Fahrzeuge wäre es, diese Zahlen auf ein Zehntel zu reduzieren. Einige Untersuchungen versprechen eine gewaltige Reduzierung von Transportkosten, einen geringeren Bedarf an Parkraum, weniger Staus und weniger Umweltverschmutzung. In Städten würde es weniger Privatfahrzeuge und große Busse geben. Stattdessen dürften autonome Elektrofahrzeuge in Sharing-Modellen die Oberhand gewinnen, die uns bei Bedarf bis vor die Haustür oder zur nächsten Haltestation eines Hochgeschwindig-

cher Schachspieler begannen 1965 mit einem Wert von 1400. Seither verbesserte sich der Spitzenwert 30 Jahre lang in einer fast perfekten Gerade. Durch Extrapolation dieser Geraden ab dem Jahr 1994 ließ sich vorhersagen, dass Kasparow 1997 von einem Computer geschlagen werden könnte. Und genau in diesem Jahr geschah es auch.

Für KI-Forscher fanden die eigentlichen Durchbrüche bereits 30 oder 40 Jahre, bevor Deep Blue in der Öffentlichkeit eine solche Berühmtheit erlangte, statt. Auch Deep Convolutional Networks gab es mit ihrem gesamten mathematischen Rüstzeug schon mehr als 20 Jahre lang, bevor sie es in die Schlagzeilen schafften.

Das Bild von Durchbrüchen in der KI, das die Medien suggerieren – darunter erstaunliche Siege über Menschen, Roboter, die in Saudi-Arabien Bürgerrechte erhalten, usw. –, spiegelt die Realität in den Forschungseinrichtungen dieser Welt kaum wider. Die Forschung besteht in weiten Teilen aus Denkarbeit, Diskussionen und mathematischen Formeln auf Whiteboards. Ständig kommen neue Ideen auf, werden verworfen und wiederentdeckt. Eine gute Idee, ein echter Durchbruch, bleibt häufig zunächst unbemerkt. Erst viel später erkennt man, dass diese Idee die Grundlage für wesentliche Fortschritte in der KI gelegt hat – vielleicht, weil jemand anderer sie zu einem passenderen Zeitpunkt neu entdeckte. Neue Ansätze werden zuerst anhand einfacher Probleme ausprobiert, um zu zeigen, dass die grundlegenden Ideen korrekt sind. Anschließend testet man sie mit schwierigeren Problemen und prüft, ob die Ansätze skalieren. Häufig verbessert eine Idee für sich die Fähigkeiten und Möglichkeiten der Systeme nicht. Erst wenn eine weitere Idee hinzukommt, können beide kombiniert werden und ihren Wert beweisen.

All das dringt nicht nach außen. Außerhalb der Forschungseinrichtungen wird KI erst sichtbar, wenn die Brauchbarkeit dieser Ideen-sammlung bewiesen und eine Schwelle überschritten wurde: der Punkt, an dem es sinnvoll ist, Geld und Entwicklungsanstrengungen zu investieren, um ein neues kommerzielles Produkt zu fertigen oder eine beeindruckende Vorführung vorzubereiten. Dann berichten die Medien von einem Durchbruch.

Es steht zu erwarten, dass viele der in der letzten Zeit in den Forschungseinrichtungen weltweit gereiften Ideen in den nächsten Jahren kommerzialisiert werden. Die Schlagzahl der neuen Anwendungen dürfte sich dabei ebenfalls erhöhen, da es mehr Finanzierungsoptionen

nen gibt und die Welt den praktischen Möglichkeiten der KI immer offener gegenübersteht. Das vorliegende Kapitel befasst sich mit dem, was uns erwartet.

Dabei werde ich auch auf Nachteile dieser technologischen Fortschritte aufmerksam machen. Wenn Sie der Meinung sind, ich hätte nicht alle Probleme aufgeführt, die die KI mit sich bringt, dann haben Sie damit recht: Auf viele davon gehe ich im nächsten Kapitel ein.

Das Ökosystem der KI

Am Anfang war die Umgebung, in der die meisten Computer agierten, praktisch wüst und leer. Einzige Eingabemethode waren Lochkarten und die Ausgabe erfolgte in Textform auf Zeilendruckern. Vielleicht lag es daran, dass die meisten Forscher in intelligenten Maschinen nur Frage-Antwort-Systeme sahen. Erst seit den 1980ern betrachtet man sie auch als in einer Umgebung wahrnehmende und handelnde Agenten.

Mit dem Aufkommen des World Wide Web in den 1990er-Jahren entstand ein ganz neues Universum, in dem sich intelligente Maschinen austoben konnten. Auch ein neues Wort wurde geprägt: *Softbot* für »Softwareroboter«. Softbots laufen ausschließlich in einer virtuellen Softwareumgebung wie dem Internet. Später wurde der Begriff durch das kürzere »Bot« ersetzt. Diese Bots registrieren Webseiten und handeln durch Ausgeben von Zeichenfolgen, URLs und so weiter.

KI-Unternehmen schossen während des Dot-Com-Booms (1997–2000) wie Pilze aus dem Boden und boten Kernfunktionalitäten für Suche und E-Commerce an, darunter Systeme zur Linkanalyse, Empfehlungs-systeme, Reputationssysteme, Preisvergleichsportale und Systeme zur Produktkategorisierung.

Anfang der 2000er verbreiteten sich Smartphones mit Mikrofonen, Kameras, Beschleunigungsmessern und GPS-Modulen rasant. Mit ihnen fanden KI-Systeme Eingang in den Alltag. Smarte Lautsprecher wie Amazon Echo, Google Home und Apple HomePod ergänzten diese Entwicklung.

Etwa 2008 waren erstmals mehr Objekte als Menschen mit dem Internet verbunden. Das Zeitalter des Internets der Dinge war angekommen. Zu diesen Dingen gehören Autos, Haushaltsgeräte, Ampeln, Verkaufsauf-maten, Thermostate, Quadroko-pter, Kameras, Umgebungs- und Umweltsensoren, Roboter und alle möglichen Produkte aus den

MÖGLICHE FORTSCHRITTE IN DER KI

Die nahe Zukunft

Am 3. Mai 1997 begann eine Schachpartie zwischen Deep Blue, einem von IBM konstruierten Schachcomputer, und Garri Kasparow, dem damaligen Schachweltmeister und möglicherweise besten menschlichen Schachspieler aller Zeiten. Die *Newsweek* betitelte die Partie als »The Brain's Last Stand« (Das letzte Gefecht des Gehirns). Am 11. Mai stand es unentschieden $2\frac{1}{2} : 2\frac{1}{2}$. In der sechsten Partie musste sich Kasparow Deep Blue geschlagen geben. Die Presse überschlug sich vor Aufregung. Der Börsenkurswert von IBM stieg über Nacht um 18 Milliarden US-Dollar. Alle Berichte sprachen von einem gewaltigen Durchbruch in der KI.

Aus Sicht der KI-Forschung selbst stellte der Wettkampf jedoch keineswegs einen Durchbruch dar. Obschon der Sieg von Deep Blue beeindruckend war, setzte er lediglich einen schon seit Jahrzehnten sichtbaren Trend fort. Die Grundlagen für Schach spielende Algorithmen wurden 1950 von Claude Shannon gelegt,¹ erhebliche Verbesserungen daran wurden Anfang der 1960er-Jahre eingeführt. Danach wuchsen die ELO-Werte (ein Rating für Schachspieler) der besten Programme stetig. Das lag in erster Linie daran, dass mit schnelleren Computern mehr Züge vorausberechnet werden konnten. 1994² begannen Peter Norvig und ich damit, Buch über die numerischen Ratings der besten Schachprogramme seit 1965 zu führen. Auf unserer Skala hatte Kasparow ein Rating von 2805. Diese Ratings menschli-

Antworten und Aufdecken von Mustern – vermutlich um ein Vielfaches leistungsfähiger als Suchmaschinen, die aktuell mit etwa einer Billion US-Dollar bewertet werden. Der Nutzen für die Forschung, zum Beispiel in den Geschichtswissenschaften und in der Soziologie, wäre unermesslich.

Es bieten sich noch mehr Möglichkeiten: Das KI-System könnte sich alle Telefonate der Welt anhören (eine Aufgabe, die etwa 20 Millionen Arbeitskräfte beschäftigen würde). Der eine oder andere Geheimdienst würde sich sicher die Finger danach lecken. Tatsächlich sind dort bereits seit Jahren Programme im Einsatz, die große Mengen von Sprachdaten nach bestimmten Stichwörtern durchsuchen und mittlerweile sogar vollständige Gespräche in durchsuchbaren Text transkribieren.²⁴ Transkriptionen sind recht nützlich, aber nicht so nützlich wie ein gleichzeitiges Verständnis *aller* Konversationen samt ihrer Inhalte.

Eine weitere »Superkraft« von Maschinen ist ihre Fähigkeit, *die gesamte Welt gleichzeitig zu sehen*: Satelliten erfassen die Erdoberfläche etwa einmal täglich mit einer Auflösung von ca. 50 Zentimetern pro Bildpunkt. Damit ist jedes Haus, jedes Schiff, jedes Auto, jede Kuh und jeder Baum weltweit erkennbar. Weit über 30 Millionen Vollzeitangestellte wären erforderlich, um all diese Aufnahmen zu untersuchen.²⁵ Momentan werden die allermeisten Satellitenbilder daher nicht von Menschen betrachtet. Computer-Vision-Algorithmen könnten diese gewaltigen Datenberge verarbeiten, daraus eine durchsuchbare Datenbank der ganzen Welt erstellen und täglich auf den neuesten Stand bringen. Sie könnten auf dieser Basis Visualisierungen und Vorhersagemodelle zu vielfältigen Themen erzeugen: Wirtschaft, Vegetationsänderungen, Tier- und Völkerwanderungen, Auswirkungen des Klimawandels und so weiter. Satellitenunternehmen wie Planet und DigitalGlobe arbeiten mit Hochdruck daran, diese Vision Wirklichkeit werden zu lassen.

Wenn globale Lagebilder verfügbar sind, lassen sich diese auch für eine globale Entscheidungsfindung nutzen. Beispielsweise lassen sich anhand von globalen Satellitendaten detaillierte Umweltmodelle erstellen, mit denen sich die Auswirkungen ökologischer und wirtschaftlicher Maßnahmen vorhersagen und die erforderlichen Analyseangaben für die nachhaltigen Entwicklungsziele der UN bereitstellen lassen.²⁶ Es gibt bereits Systeme für Smart Cities, die zur Optimierung von Verkehrsleitung, ÖPNV, Müllabfuhr, Straßeninstandsetzungen, Umwelt-

pflege und anderen Aufgaben zum Wohl der Bürger dienen. Es ist gut vorstellbar, dass diese Systeme auf Landesebene ausgedehnt werden. Bis vor Kurzem waren für eine solche Koordination gewaltige, ineffiziente, bürokratische Hierarchien erforderlich. Diese werden zwangsläufig durch Mega-Agenten ersetzt werden, die sich um immer mehr Aspekte unseres sozialen Lebens kümmern. All diese Möglichkeiten bergen natürlich auch die Gefahr von Eingriffen in unsere Privatsphäre oder einer Kontrolle im globalen Maßstab. Ich greife dieses Thema im nächsten Kapitel auf.

Wann kommt die superintelligente KI?

Ich werde oft gefragt, wann meiner Meinung nach die superintelligente KI kommt. Normalerweise weigere ich mich, auf diese Frage zu antworten. Dafür gibt es drei Gründe: Erstens gab es hierzu schon viele Vorhersagen, die sich als falsch erwiesen haben.²⁷ Zum Beispiel schrieb der Wirtschaftswissenschaftler, KI-Pionier und Nobelpreisträger Herbert Simon im Jahr 1960: »Maschinen werden [technisch] innerhalb von 20 Jahren in der Lage sein, jede Arbeit zu erledigen, die heute Menschen ausführen können.«²⁸ Und 1967 schrieb Marvin Minsky, einer der Organisatoren der Dartmouth-Konferenz, bei der 1965 die KI als akademisches Fachgebiet begründet wurde: »In einer Generation wird es meiner Überzeugung nach nur wenige Aspekte des Intellekts geben, die eine Maschine nicht beherrscht. Das Problem, künstliche Intelligenz zu schaffen, wird substanzial gelöst sein.«²⁹

Der zweite Grund, aus dem ich mich nicht auf ein Datum für eine superintelligente KI festlege, besteht darin, dass es keine klare Grenze gibt, ab der eine KI superintelligent ist. Maschinen leisten in einigen Bereichen bereits heute Übermenschliches. Sie werden darin immer besser werden und es werden neue Bereiche hinzukommen. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird es übermenschliche allgemeine Wissenssysteme, übermenschliche biomedizinische Forschungssysteme, übermenschlich geschickte und agile Roboter, übermenschliche Controlling-Systeme für Firmen und so weiter geben, noch bevor ein vollständiges, allgemeines und superintelligentes KI-System das Licht der Welt erblickt. Mit diesen »teilweise superintelligenten« Systemen werden viele der Probleme aufkommen, vor die uns auch ein allgemein intelligentes System stellen würde.