

Wie KI das Gesundheitswesen menschlicher macht

DEEP MEDICINE

ERIC TOPOL



Künstliche
Intelligenz
in der Medizin

INHALT

Vorwort	6
Anmerkung zur deutschen Ausgabe	10
1 Einführung in Deep Medicine	11
2 Shallow Medicine	29
3 Medizinische Diagnose	45
4 Deep Learning – Status Quo	61
5 Die Risiken der Künstlichen Intelligenz	89
6 Ärzte und Muster	109
7 Kliniker ohne Muster	131
8 Psychische Gesundheit	155
9 KI und das Gesundheitswesen	171
10 Tiefe Erkenntnisse	193
11 Tiefe Ernährung	213
12 Der virtuelle medizinische Assistent	233
13 Tiefe Empathie	257
Danksagung	281
Nachwort zur deutschen Ausgabe	283
Endnoten	289
Index	325
Über den Autor	335

Vorwort

»Es ist ganz wahr, was die Philosophie sagt, dass das Leben rückwärts verstanden werden muss. Aber darüber vergisst man den anderen Satz, dass vorwärts gelebt werden muss.«

– SØREN KIERKEGAARD

Zu den vielen Eigenheiten, die uns menschlich machen und von anderen Tieren unterscheiden, gehört wohl der Zwang, zurückzublicken. Ich kann mir kaum vorstellen, dass eine andere Spezies mitten in der Nacht über verpassten Chancen oder Aufträgen brütet. Doch gehört diese Rückschau auf unser Wirken als Spezies für uns auch zu einem Lernprozess. Wir befassen uns aus einer höheren Perspektive mit Geschichtsaufzeichnungen und sehen uns an, welche Fortschritte wir gemacht haben – von der Zähmung des Feuers bis hin zur Entwicklung des Mikrochips. Und dann versuchen wir, den Sinn dahinter zu verstehen.

Kierkegaards Postulat vom vorwärts gelebten, doch rückwärts verstandenen Leben bedeutet vielleicht nur, dass wir uns der Vergangenheit erinnern und im besten Fall (ungenau) Aufzeichnungen davon bewahren. Mögen er und George Santayana mir verzeihen, wenn ich behaupte, dass ein Verständnis der Geschichte uns nicht davor bewahrt, sie zu wiederholen. Ein kurzer Blick in die Nachrichten beweist, dass ich recht habe. Somit ist die Vergangenheit selbst dort unzuverlässig, wo wir aus gemachten Fehlern lernen möchten. Nur die Zukunft ist gewiss, denn wir können sie beeinflussen.

Das bringt mich zu den Zukunftsforschern, zu denen auch der Verfasser dieses wunderbaren Buches gehört. Wenn solche Menschen hören, dass die Gebrüder Wright den Traum vom Fliegen umgesetzt haben, haben sie Billigflieger, Luftfahrt-Drehkreuze und Menschen auf dem Mond vor Augen. Diese Historiker des Jetzt widmen sich der Gegenwart. Statt zu fragen, wie man die Risiken der Vergangenheit vermeiden kann, geht es für sie darum, bestmöglich von den Vorteilen zu profitieren, die die Zukunft bietet. Stift und Papier – oder das Tablet – in der Hand, finden wir sie an den Grenzen der bekannten Wissenschaft und Technik.

Sie befragen die Pioniere und Wegbereiter und sogar die Wagemutigen, die über den Rand der Erdscheibe gefallen sind. Sie sprechen mit Erfindern, Wissenschaftlern, Forschern, Querdenkern und Träumern. Sie hören zu, sie sehen genau hin, sie filtern, und sie gewinnen gebietsübergreifende Erkenntnisse und Wissen, um uns allen den Sinn davon zu vermitteln. In *Deep Medicine* erfahren Sie, welch beeindruckend intellektuellen und außergewöhnlich kreativen Dienst diese Menschen uns damit erweisen. Diese Aufgabe nutzt beide Gehirnhälften – die logische wie die emphatische – und auch die Musen. Darum ist dieses Buch zu gleichen Teilen Inspiration und Exposition.

Mit *Deep Medicine* entführt Eric Topol uns zum dritten Mal auf eine Entdeckungsreise in die Zukunft. Betrachtet man seine bisherigen Bücher in der Rückschau, wird seine Weitsicht offenkundig. In *Deep Medicine* erklärt er, dass wir im vierten industriellen Zeitalter leben und uns inmitten eines so tief greifenden Wandels befinden, dass die Erfindung der Dampfkraft, der Eisenbahn, der Elektrizität, der Massenfertigung und sogar das Computerzeitalter dagegen verblassen. In diesem vierten industriellen Zeitalter dreht sich alles um Künstliche Intelligenz (KI), Robotik und Big Data. Es kündigt von einer umwälzenden Revolution, die sich bereits heute in unsere Lebens- und Arbeitsweise zeigt – und vielleicht sogar in unserer Art zu denken. Es bietet uns großartige Chancen, birgt aber auch das Risiko, den großen Graben zwischen jenen, die viel haben, und jenen, die mit jedem Jahr weniger haben, zu vertiefen.

Diese Revolution wird jedes menschliche Bestreben überholen, die Medizin eingeschlossen. Gerade die Medizin befindet sich heute in einer Krise. Als Berufsstand haben wir unsere Patienten trotz all der außergewöhnlichen Fortschritte in der Kunst und Wissenschaft der Heilkunde in den letzten vier Jahrzehnten zu häufig enttäuscht. Wir beachten bewährte Richtlinien nicht, und wir haben verlernt, den einzelnen Menschen vor uns wirklich zu sehen. Wir kennen sein Genom, aber wir hören ihm nicht zu. Wir erkennen das gebrochene Herz vor uns nicht. Wir übersehen die Neurofibrome auf seiner Haut, obwohl sie für die anfallsartige Hypertonie von Bedeutung sind, weil wir nicht die Zeit haben, die der Patient zum Entkleiden benötigt, und weil es Zeit kostet, den Körper zu betrachten anstelle des Monitors. Wir übersehen die eingeklemmte Hernie bei einem älteren Patienten, die Ursache für sein Erbrechen ist, und warten stattdessen auf eine teure CT und die Radiologin, die uns sagt, was wir mit eigenen Augen hätten sehen können. Länder mit den höchsten Ausgaben für das Gesundheitswesen schneiden im Gegensatz zu solchen, in denen sehr viel weniger Geld bereitsteht, bei grundlegenden Kennzahlen wie der Säuglingssterblichkeit schlechter ab. Ich finde es bezeichnend, dass *Deep Medicine* mit einer tiefsinnigen, persönlichen und aufschlussreichen Anekdote aus der schmerzhaften und schlimmen medizinischen Geschichte des Autors beginnt,

in der dieser nicht als Person wahrgenommen wurde, die an einer seltenen Erkrankung leidet.

Es ist wenig überraschend, dass die Technologie trotz der bahnbrechenden Möglichkeiten, den Körper zu erfassen, seine Molekularstruktur zu bestimmen und zu überwachen, ebenso blind wie der Mensch sein kann. Ein herausragendes Beispiel ist die elektronische Krankenakte, die heute in den meisten amerikanischen Krankenhäusern genutzt wird. Diese Akte wurde für Abrechnungszwecke konzipiert, nicht als Arbeitshilfe für Ärztinnen und Krankenpfleger. Sie hat das Wohlbefinden von Ärzten beeinträchtigt und ist der Grund für Burn-out und Erschöpfung. Das System hat zu Unaufmerksamkeit gegenüber dem Patienten geführt, indem es diesen durch einen neuen Fokus im Untersuchungsraum ersetzt hat: den Monitor, der unseren Blick fesselt und vom Menschen abzieht. Anatole Broyard wünscht sich in seinem Buch *Intoxicated by My Illness*, einer quälenden Geschichte des letztendlich tödlichen Kampfes eines Mannes gegen den Prostatakrebs, von seinem Urologen, dass dieser »sich vielleicht fünf Minuten mit meiner Lage befassen solle, mir nur dieses eine Mal seine ganze Aufmerksamkeit widmen und einen kurzen Augenblick sein Mitgefühl zeigen, über den Körper auch die Seele untersuchen solle, um mein Leiden wirklich zu begreifen, denn jeder Mensch leidet auf seine eigene Weise«.¹ Diese beschämende Aussage aus einer Zeit kurz vor Einführung elektronischer Krankenunterlagen drückt das fundamentale Bedürfnis eines jeden Kranken aus. Sie ist zeitlos und – so vermute ich – unveränderlich, auch wenn sich unsere Welt verändert. Es lässt sich wirklich nicht oft genug wiederholen: *Jeder Mann und jede Frau leidet auf seine bzw. ihre eigene Weise.*

Ich bin gespannt auf die Zukunft und freue mich über die Möglichkeit, Big Data in den Griff zu bekommen. Allein, weil wir mit künstlicher Intelligenz und Deep Learning gewaltige Datenmengen durchsuchen und Erkenntnisse daraus gewinnen können, wird die Genauigkeit von Diagnosen und Prognosen dramatisch besser werden. Damit will ich keinesfalls sagen, dass diese Technologien den Menschen ersetzen werden. Vielmehr stellen sie Empfehlungen zur Verfügung, die vielleicht genauer denn je sind. Doch diese Empfehlungen müssen von einem intelligenten, fürsorglichen und aufmerksamen Arzt und Pflegeteam auf und gemeinsam mit dem einzelnen Menschen, um den es geht, abgestimmt werden. Vor mehr als 2.000 Jahren sagte Hippokrates: »Es ist wichtiger zu wissen, welche Person eine Krankheit hat, als zu wissen, welche Krankheit eine Person hat.« 1981 schrieben Robert Califf und Robert Rosati in einem Leitartikel über die Nutzung von Computern bei der Gefahrenabschätzung nach der Interpretation von Belastungs-EKGs: »Die korrekte Interpretation und Nutzung computergestützter Daten ist ebenso sehr von umsichtigen Ärzten abhängig wie jede andere bisherige Daten-

quelle.«² Dieses zeitlose Prinzip behält seine Gültigkeit, sofern es um Menschen und nicht um Autoteile am Fließband geht.

Letztlich kommen wir zu dem ruhmreichen Schluss, dass wir Menschen sind, körperliche Wesen, ein Geist mit all seiner Komplexität in einem ebenso komplexen Körper. Das Zusammenspiel zwischen diesen beiden bleibt ein Mysterium. Kein Geheimnis ist allerdings: Wenn wir krank sind, wünschen wir inniglich, dass man sich um uns kümmert. Erkrankungen machen aus uns kleine Kinder, und das gilt bei schweren Erkrankungen umso mehr. Und natürlich fordern wir die neueste Technik, wissenschaftliche Präzision, die beste Therapie und einen Arzt, der uns »kennt«. Dieses Kennen soll anders als zu Hippokrates' Zeiten auch das Wissen um das Genom, das Proteom, das Metabolom, das Transkriptom, KI-gestützte Prognosen usw. umfassen. Dennoch: Vor allem wünschen wir uns, dass all dieses Wissen von einem fürsorglichen, mitfühlenden Team aus Ärzten und Pflegern angewandt wird. Unser Arzt – ein interessierter Mensch, keine Maschine – soll uns seine Zeit schenken und uns sorgfältig untersuchen. Das gilt auch dann, wenn nur der Krankheitsherd ohne Biopsie, Bildgebung oder medizinischen Bericht gesucht wird, damit wir als Person wahrgenommen werden und unser Schmerz durch Berührung der entsprechenden Stelle erfasst wird. Wie schon Peabody es vor vielen Jahren ausdrückte: »The secret of the care of the patient is caring for the patient.« (Das Geheimnis der Fürsorge ist es, sich um den Patienten zu sorgen.) Er wollte damit ausdrücken, dass Zuwendung und Fürsorge für den Patienten aktiv gelebt werden müssen. Es geht um die Interaktion zwischen Behandelndem und Behandeltem, also viel mehr als der einfache Begriff »Pflege« im Deutschen auszudrücken vermag.

Diejenigen, die sich um uns kümmern, sollen unser Innerstes kennen, unsere tiefsten Ängste, das, wofür wir leben, und das, wofür wir sterben würden.

Das ist unser tiefstes Verlangen und wird es immer sein.

Abraham Verghese, MD

Department of Medicine, Stanford University

Anmerkung zur deutschen Ausgabe

Im vorliegenden Buch beschreibt der amerikanische Arzt Eric Topol, wie Deep Learning und Künstliche Intelligenz gegenwärtig das Gesundheitswesen umwälzen und welche Auswirkungen Deep Learning auf medizinische Anwendungen haben kann.

Der Autor gibt auch einen Einblick in die Entstehungsgeschichte der Künstlichen Intelligenz (KI). Dabei legt er seinen Schwerpunkt auf Entwicklungen in der Anglosphäre, auch wenn Deep Learning (DL) und die moderne KI an Orten erfunden wurden, wo Englisch keine offizielle Sprache ist. Auch im medizinischen Bereich wurden internationale Wettbewerbe durch DL erstmals durch Forscher gewonnen, die nicht aus der Anglosphäre stammen. Deshalb finden Sie am Ende des Buches ein ergänzendes Nachwort von Professor Jürgen Schmidhuber, in dem er die im Rest des Buches nicht berücksichtigten Pioniere des Gebiets hervorhebt.

Einführung in Deep Medicine

»So dürfen wir hoffen, nicht einfach eine schöne neue Welt zu erreichen, keine perfektionistische Utopie, sondern das bescheidenere und viel begehrenswertere Ziel – eine wirklich menschliche Gesellschaft.«

– ALDOUS HUXLEY, 1948

»Lassen Sie sich von Ihrem Internisten ein Antidepressivum verschreiben«, hörte ich von meinem Orthopäden. Meine Frau und ich starrten einander mit großen Augen ungläubig an. Schließlich war ich nicht einen Monat nach meiner OP, einer Implantation einer Kniegelenksprothese, ins Krankenhaus gekommen, um psychiatrische Ratschläge zu erhalten.

Ich hatte aufgrund einer seltenen Erkrankung namens *Osteochondrosis dissecans* schon seit dem Teenager-Alter Probleme mit den Knien. Die Ursache dieser Krankheit ist noch immer unbekannt, aber ihre Auswirkungen sind vertraut. Als ich im Alter von 20 Jahren mit der Ausbildung an der medizinischen Hochschule begann, war bei mir bereits ein freier Gelenkkörper entfernt worden, und ich hatte umfangreiche chirurgische Eingriffe an beiden Knien hinter mir. Im Laufe der nächsten 40 Jahre musste ich körperliche Aktivitäten immer weiter einschränken und beispielsweise auf Laufen, Tennis, Wandern und den Ellipsentrainer verzichten. Sogar normales Gehen wurde trotz Steroid- und anderen intraartikulären Injektionen ins Knie zur schmerzhaften Angelegenheit. So bekam ich im Alter von 62 Jahren ein neues linkes Knie, wie auch mehr als 800.000 andere Amerikaner.

Der Knieersatz zählt damit zu den häufigsten operativen Eingriffen in den USA. Mein Orthopäde hielt mich für den perfekten Kandidaten: Ich war relativ jung, schlank und körperlich fit. Seiner Aussage nach war der einzige nennenswerte Nachteil ein ein- bis zweiprozentiges Infektionsrisiko. Tatsächlich lernte ich ein weiteres Risiko schmerzhaft kennen.

Am zweiten Tag nach der Operation begann ich mit dem dafür üblichen und, so wurde mir gesagt, einzigen Physiotherapieprogramm. Dabei wird das Knie intensiv gebeugt und gestreckt, um eine Narbenbildung im Gelenk zu verhindern. Ich war nicht zu einer nennenswerten Beugung imstande. Daher stellte ich den Sattel meines Trimmrads weit nach oben und schrie während der ersten Umdrehungen vor Schmerzen. Selbst Oxycodon half nicht. Einen Monat später war mein Knie lila, extrem geschwollen, schrecklich steif und weigerte sich nach wie vor, beim Beugen mitzumachen. Es tat so weh, dass ich höchstens eine Stunde am Stück schlief – und immer wieder vor Schmerzen weinen musste. Wegen dieser Weinkrämpfe empfahl mein Orthopäde den Einsatz von Antidepressiva. Verrückt, nicht wahr? Doch dann empfahl der Chirurg eine intensivierte Physiotherapie, obwohl es mir nach jeder Sitzung schlechter ging. Ich konnte das Therapiezentrum kaum verlassen oder mich ins Auto setzen, um nach Hause zu fahren. Die schrecklichen Schmerzen, die Schwellung und die Steifigkeit blieben beharrlich. Ich suchte verzweifelt nach Erlösung: Akupunktur, Elektroakupunktur, Kaltlaser-Therapie, elektrische Stimulation (TENS), topische Salben und Nahrungsergänzungsmittel wie Kurkumin, Sauerkirsche und viele mehr. Dabei war ich mir völlig im Klaren darüber, dass keines dieser Mittel einen in Studien nachgewiesenen Effekt hat.

Meine Frau unterstützte mich die ganze Zeit und stieß zwei Monate nach der OP auf ein Buch mit dem Titel *Arthrofibrosis* (Gelenkversteifung). Der Begriff war mir nicht geläufig, aber genau daran litt ich. Eine Gelenkversteifung oder Arthrofibrose ist eine Komplikation, die in zwei bis drei Prozent der Fälle nach einem Knieersatz auftritt. Damit ist sie zwar ein seltener Umstand, aber immer noch häufiger als das Infektionsrisiko, vor dem mein Orthopäde gewarnt hatte. Schon auf der ersten Seite beschreibt das Buch meinen Fall kurz und knapp: »Arthrofibrose ist eine Katastrophe«, so heißt es dort. Genauer erklärt handelt es sich bei der Arthrofibrose um eine bösartige Entzündungsreaktion nach einem Knieersatz – zum Beispiel die Abstoßung eines künstlichen Kniegelenks, was zu einer heftigen Narbenbildung führt. Also fragte ich meinen Orthopäden bei der Kontrolluntersuchung nach zwei Monaten, ob ich wohl an Arthrofibrose leide. Er bestätigte mir das ohne Umschweife und fügte hinzu, dass er im ersten Jahr nach der OP nur wenig für mich tun könne. Man müsse der Entzündung ihren Lauf lassen, bevor er später das Narbengewebe entfernen könne. Schon bei dem Gedanken, dass ich

ein ganzes Jahr so weitermachen oder mich einer weiteren Operation unterziehen müsse, wurde mir schlecht.

Ein Freund riet mir dann dazu, eine andere Physiotherapeutin aufzusuchen. In ihrer vierzigjährigen Praxis hatte sie bereits viele Patienten mit *Osteochondrosis dissecans* erlebt und wusste, dass die übliche Physiotherapie für Patienten wie mich der schlechteste Ansatz überhaupt ist. Anstelle einer starken, erzwungenen Bewegung für maximales Beugen und Strecken des Knies (das in diesem Fall zu vermehrter Narbenbildung führte), ging sie die Sache langsam und vorsichtig an. Zuerst wurde mir aufgetragen, nicht mehr mit Gewichten zu arbeiten und auch die Übungen einzustellen. Vielmehr sollte ich Entzündungshemmer einsetzen. Sie notierte handschriftlich ihre Anweisungen für mich und schrieb mir jeden zweiten Tag eine SMS, um sich nach dem Befinden »unseres Knies« zu erkundigen. Das war meine Rettung, und schon bald befand ich mich auf dem Weg der Genesung. Noch heute, Jahre später, muss ich täglich Kniebandagen anbringen, weil mein Knie so schlecht heilt. Einen Großteil dieser Qualen hätte ich mir ersparen können.

Wie Sie in diesem Buch erfahren werden, hätte Künstliche Intelligenz (KI) vorher sagen können, dass nach meiner OP mit Schwierigkeiten zu rechnen gewesen wäre. Eine umfassende Nachforschung in der medizinischen Literatur – sofern denn Physiotherapeutinnen wie die meine ihre Erkenntnisse geteilt hätten – hätte vermutlich gezeigt, dass bei mir eine abweichende, maßgeschneiderte Physiotherapie nötig war. Doch nicht nur Mediziner würden von einem umfassenderen Wissen hinsichtlich der Risiken für ihre Patienten profitieren. Auch für die Patienten selbst wäre ein virtueller medizinischer Assistent auf dem Smartphone oder in den eigenen vier Wänden nützlich, der sie vor dem hohen Risiko einer Arthrose im Rahmen der üblichen Physiotherapie warnt. Ein solcher Assistent könnte mir sogar Ansprechpartner für eine sanfte Rehabilitation nennen und so machen Sorgen vorbeugen. Doch leider war mir die Gefahr nicht bekannt, und mein Orthopäde hatte die *Osteochondrosis dissecans* in meiner Krankengeschichte bei der Risikoabschätzung überhaupt nicht in Betracht gezogen – obwohl er später bestätigte, dass sie wesentlich zu meinen schwerwiegenden Problemen beigetragen hatte.

Vieles, was im Gesundheitswesen schief läuft, lässt sich nicht durch moderne Technologien, Algorithmen oder Maschinen beheben. Die roboterhafte Antwort meines Arztes auf meine Verzweiflung ist stellvertretend für diesen Mangel bei der Behandlung. Gewiss war die Operation fachmännisch ausgeführt worden – aber das ist nur Technik. Der Gedanke, Medikamente gegen Depressionen zu verschreiben, zeigt deutlich den Mangel an menschlicher Verbundenheit und Empathie, der im medizinischen Sektor heute vorherrscht. Natürlich war ich deprimiert,

aber diese Depression war nicht die Wurzel des Übels: Mein Problem waren die starken Schmerzen und die an den Blechmann aus dem *Zauberer von Oz* erinnernde Beweglichkeit. Das fehlende Mitgefühl des Orthopäden war greifbar. In all den Monaten nach dem Eingriff hat er mich nicht einmal kontaktiert, um zu erfahren, wie es mir geht. Die Physiotherapeutin dagegen verfügte nicht nur über das medizinische Fachwissen und die Erfahrung, um meinen Zustand zu erkennen, sondern war auch wirklich um mich besorgt. Kein Wunder, dass wir in Amerika unter einer Opioidkrise leiden, wenn es doch für Ärzte so viel einfacher ist, Medikamente zu verschreiben als den Patienten zuzuhören und Verständnis für sie aufzubringen.

Nahezu jeder Mensch mit einer chronischen Erkrankung musste das schon am eigenen Leib erfahren. Zum Glück für mich bin ich Teil des medizinischen Systems. Aber wie Sie gelesen haben, ist das Problem so allgegenwärtig, dass selbst Insider nicht genug wissen, um eine gute Betreuung zu gewährleisten. Künstliche Intelligenz allein wird das Problem auch nicht lösen. Dazu bedarf es schon menschlicher Eingriffe. Wenn Maschinen intelligenter werden und uns so manche Aufgabe abnehmen, finden die Menschen vielleicht die Zeit dafür, wieder menschlich zu sein.

Die KI in der Medizin ist keine Zukunftsmusik. Bereits jetzt rettet sie Leben. Ein enger Freund, Dr. Stephen Kingsmore, ist medizinischer Genetiker und leitet ein wegweisendes Programm am *Rady Children's Hospital* in San Diego. Kürzlich erzielten sein Team und er einen Guinness World Record für die vollständige Sequenzierung und Analyse eines Genoms aus einer Blutprobe binnen 19,5 Stunden.¹

Vor einer Weile wurde dort ein gesunder Junge mit seiner stillenden Mutter drei Tage nach der Geburt entlassen. Doch an seinem achten Lebenstag kam die Mutter mit ihm in die Notaufnahme des Rady's. Er hatte ständig Krampfanfälle, auch *Status epilepticus* genannt. Doch von einer Infektion keine Spur. Eine Computertomografie zeigte keine Besonderheiten des Gehirns, im Elektroenzephalogramm waren lediglich die unablässigen Anfälle sichtbar. Unzählige starke Medikamente brachten keine Linderung, sondern verstärkten die Anfälle noch. Hirnschäden und sogar der Tod waren zu befürchten.

Dann wurde eine Blutprobe zur schnellen Genomsequenzierung an das *Rady's Genomic Institute* übergeben. Die Sequenz umfasste 125 Gigabyte an Daten. Das Genom des Säuglings unterschied sich an nahezu 5 Millionen Stellen vom Standard. In nur 21 Sekunden verarbeitete eine als NLP (*Natural Language Processing* oder Verarbeitung natürlicher Sprache) bezeichnete KI die elektronische Krankenakte des Kindes und ermittelte 88 phänotypische Merkmale (das sind körperliche Veränderungen durch die Krankheit) – und damit mehr als zwanzig Mal so viele,

wie die Ärzte notiert hatten. Machine-Learning-Algorithmen durchsuchten die etwa 5 Millionen genetischen Varianten in rasantem Tempo; das Ergebnis waren rund 700.000 seltene Varianten, von denen 962 als Krankheitsursachen bekannt sind. Unter Einbeziehung der phänotypischen Daten des Jungen schlug das System eine Variante im Gen ALDH7A1 als wahrscheinlichste Ursache vor. Diese Variante ist sehr selten und tritt bei weniger als 0,01 Prozent der Bevölkerung auf. Sie führt zu einer Stoffwechselstörung, die ihrerseits Krampfanfälle verursacht. Zum Glück lassen sich die Auswirkungen durch Gabe von Vitamin B6 und Arginin – eine Aminosäure – bei gleichzeitiger Beschränkung von Lysin – ebenfalls eine Aminosäure – eliminieren. Sobald diese Änderungen in seiner Ernährung umgesetzt waren, hörten die Anfälle schlagartig auf, und der Junge konnte nur 36 Stunden später nach Hause! Bei den Kontrolluntersuchungen war er völlig gesund, ohne jedes Anzeichen einer Hirnschädigung oder verzögerten geistigen Entwicklung.

Das Leben des Kindes konnte nur durch die Bestimmung der Hauptursache seiner Krankheit gerettet werden. Nur wenige Krankenhäuser weltweit sequenzieren das Genom kranker Neugeborener und setzen Künstliche Intelligenz ein, um die Informationen über den Patienten und das Genom miteinander zu verknüpfen. Gut möglich, dass sehr erfahrene Ärzte irgendwann die richtige Behandlung gefunden hätten. Doch Computer und Maschinen können diese Aufgabe sehr viel schneller und besser als Menschen erledigen.

Die Kombination aus den Anstrengungen und Fähigkeiten von Mensch und KI führen zu Synergien, von denen die Patienten und die Medizin profitieren. Bevor wir uns jedoch zu sehr in die Möglichkeiten der KI hineinsteigern, möchte ich von einem Erlebnis mit einem meiner Patienten berichten.

»Ich will diese Behandlung«, forderte mein Patient neulich bei einem Gespräch.

Der weißhaarige, blauäugige Siebzigjährige hatte im Laufe seines Lebens mehrere Firmen geführt und litt an einer seltenen und schweren Lungenerkrankung namens *idiopathische Lungenfibrose* (idiopathisch heißt bei Medizinern übrigens, dass die Ursache unbekannt ist). Es stand so schlimm, dass er und sein Pulmonologe für den Fall einer weiteren Verschlimmerung eine Lungentransplantation in Betracht zogen. Vor diesem Hintergrund kam ein neues Symptom hinzu: eine frühe Form der *Fatigue* (starke Erschöpfung), durch die er nicht mehr in der Lage war, um den Block zu laufen oder eine Bahn zu schwimmen. Sein Lungenarzt hatte Lungenfunktionstests durchgeführt, doch diese wiesen keine Veränderungen auf. Damit war ziemlich sicher, dass die Lunge nicht der Grund für den Erschöpfungszustand war.

Er besuchte mich in Begleitung seiner Frau; beide waren sehr besorgt und deprimiert. Er schleppte sich mühsam ins Behandlungszimmer. Seine Blässe und der

resignierte Blick schockierten mich. Die Ehefrau bestätigte seine Beschreibung der Symptome: Seine Mobilität war stark eingeschränkt, ebenso die Bewältigung der täglichen Aktivitäten, von sportlicher Betätigung gar nicht zu sprechen.

Nachdem ich seine Vorgeschichte geprüft und ihn untersucht hatte, brachte ich die Möglichkeit einer Herzerkrankung ins Spiel. Einige Jahre zuvor hatte er beim Gehen Schmerzen in der Wade gehabt und erhielt einen Stent in der Hüftarterie des linken Beins. Ich vermutete eine mögliche Cholesterinansammlung in einer Herzkranzarterie, obwohl bis auf sein Alter und Geschlecht keine weiteren Risikofaktoren für eine Herzkrankheit präsent waren. Also verschrieb ich eine Computertomografie zur Kartierung seiner Arterien. Die rechte Herzkranzarterie wies eine 80-prozentige Verengung auf, doch die anderen beiden waren kaum betroffen. Das passte nicht zusammen. Tatsächlich trägt die rechte Herzkranzarterie nur unwesentlich zur Versorgung des Herzmuskels bei. In meinen 30 Jahren als Kardiologe (davon 20, in denen ich verengte Herzkranzgefäße öffnete), war mir noch kein Patient untergekommen, der an einer derartigen Erschöpfung litt, bei dem nur die rechte Arterie betroffen war.

Ich erklärte den beiden, dass die Sache für mich keinen Sinn ergab. Möglicherweise lagen zwei unzusammenhängende Diagnosen vor, und der Zustand der Arterie hatte nichts mit seiner Erschöpfung zu tun. Allerdings deutete die schwere Lungenerkrankung durchaus darauf hin, dass die Verengung eine Rolle spielte. Leider wuchs durch das Lungenproblem auch das Behandlungsrisiko.

Ich überließ die Entscheidung also ihm. Er dachte ein paar Tage nach und entschied sich dann für einen Stent in der rechten Herzkranzarterie. Ich war überrascht, denn lange Jahre hatte er sich gegen jegliche Behandlung und sogar Arzneimittel gestraubt. Interessanterweise fühlte er sich nach dem Eingriff viel kräftiger. Da der Stent über sein Handgelenk eingeführt worden war, konnte er schon wenige Stunden später nach Hause. Am selben Abend hatte er einen längeren Spaziergang hinter sich, und vor Ablauf einer Woche schwamm er bereits mehrere Bahnen. Er fühlte sich, so sagte er, stärker und besser als seit Jahren. Und noch Monate danach nahm seine Ausdauer zu.

Warum ich das erzähle? Nun, ein Computeralgorithmus hätte diese Diagnose nicht gestellt. Bei all dem Hype darüber, wie KI das Gesundheitswesen umkrempelt: Hätte man die KI mit der Krankenakte dieses Patienten und der gesamten medizinischen Literatur gefüttert, wäre sie nie zu dem Schluss gekommen, diesen Eingriff durchzuführen. Es gibt nämlich keine Hinweise darauf, dass ein Öffnen der rechten Herzkranzarterie Erschöpfungszustände mindert – und eine KI kann nur das lernen, was sie in den bereitgestellten Daten findet. Versicherungen, die Algorithmen bei der Prüfung einer Kostenübernahme einsetzen, hätten ziemlich sicher jede Erstattung abgelehnt.

Und doch ging es dem Patienten danach wesentlich und dauerhaft besser. War das eine Placebo-Reaktion? Das ist recht unwahrscheinlich. Ich kannte den Mann schon viele Jahre, und er spielt jede Änderung eines Gesundheitszustands – ob positiv oder negativ – herunter. Bei ihm kommt Begeisterung nur mit angezogener Handbremse vor, man könnte ihn fast als Griesgram bezeichnen. Er wäre der letzte Mensch, von dem ich eine so positive Reaktion auf ein Placebo erwarte.

In der Rückschau gibt es wahrscheinlich einen Zusammenhang mit der Lunge. Eine Lungenfibrose führt zu hohem Druck in den Lungenarterien, welche die Lunge mit Blut versorgen. In der Lunge wird das Blut dann mit Sauerstoff angereichert. Die rechte Herzkammer pumpt das Blut zur Lunge. Der hohe Blutdruck in den Arterien bedeutet, dass Blut unter hohem Kraftaufwand hinein transportiert werden muss. Dadurch wird die rechte Herzkammer stark belastet. Der Stent in der rechten Herzkranzarterie, die zur rechten Herzkammer führt, hat dann diese Last gemildert. Eine derart komplexe Interaktion des Blutkreislaufs einer Person mit einer seltenen Lungenerkrankung war in der medizinischen Literatur nicht belegt.

Der Fall mahnt uns, dass jeder von uns vielschichtig ist und niemals ganz und gar von einer Maschine verstanden werden kann. Gleichzeitig hebt er die Bedeutung der Menschlichkeit in der Heilkunde hervor: Uns als Ärzten ist schon lange klar, dass Patienten ihren Körper am besten kennen und wir deshalb gut zuhören sollten. Algorithmen sind kalte, unmenschliche Prognosewerkzeuge, die das menschliche Wesen nicht kennen können. Letztendlich hatte der Patient in diesem Fall das Gefühl, dass die Arterienverengung die Ursache war – und er hatte Recht. Ich war skeptisch und hätte mir das Ergebnis nicht ausmalen können. Natürlich habe ich mich sehr über die Besserung gefreut.

Die Künstliche Intelligenz hat sich langsam in den Alltag eingeschlichen. Sie ist bereits allgegenwärtig, von der Autokorrektur im Smartphone, den Empfehlungen auf Basis unseres Google-Suchverlaufs oder den gehörten Songs bis hin zu Alexa, die unsere Fragen beantwortet oder das Licht ausmacht. Die ersten KI-Konzepte entstanden vor mehr als 80 Jahren, der Begriff selbst wurde in den 1950ern geprägt, aber das wahre Potenzial im Gesundheitswesen gelangt erst neuerdings in unser Bewusstsein. Die Künstliche Intelligenz in der Heilkunde verspricht uns eine ganzheitliche Übersicht der medizinischen Daten einer Einzelperson, eine bessere Entscheidungsfindung, das Vermeiden von Fehldiagnosen und unnötigen Behandlungen, Hilfe beim Sortieren und Interpretieren geeigneter Untersuchungen und Behandlungsempfehlungen. All das ist auf der Grundlage von Daten möglich. Wir befinden uns mitten im Zeitalter von Big Data: Jedes Jahr fallen welt-

weit Zettabytes an Daten an – ein Zettabyte ist eine 1 mit 21 Nullen und entspricht einer Milliarde Terabytes. Damit ließen sich etwa eine Billion Smartphones füllen. In der Medizin nehmen große Datensätze die Form von Sequenzen des vollständigen Genoms, hochauflösenden Bildern und stetigen Werten tragbarer Sensoren, auch *Wearables* genannt, an. Und während die Daten unablässig strömen, werten wir doch nur einen winzigen Bruchteil davon aus. Schätzungen sprechen von maximal fünf Prozent oder noch weniger. Das ist so, als würde man sich in Schale werfen, ohne das Haus zu verlassen. Doch Fortschritte im Bereich der künstlichen Intelligenz erlauben uns, Herr der gewaltigen Datenmengen zu werden.

Das Feld der KI umfasst viele Teilgebiete. So gehören logistische Regression, Bayes-Netze, Random Forests, Support Vector Machines, Expertensysteme und viele andere Hilfsmittel für die Datenanalyse zum klassischen Machine Learning. Mit einem Bayes-Netz lassen sich Wahrscheinlichkeiten modellieren. Dieses Modell könnte für die Symptome einer Person eine Liste möglicher Diagnosen und der zugehörigen Wahrscheinlichkeiten ausgeben. Als wir in den 1990er Jahren Klassifikations- und Regressionsbäume erstellten, um den Daten eine Stimme zu verleihen und in der automatischen Analyse unseren Interpretationsbias außen vor zu lassen, nannten wir das witzigerweise noch nicht Machine Learning. Doch mittlerweile gibt es grundlegende Veränderungen bei dieser Art der Statistik, und sie wird sehr geschätzt. In den letzten Jahren finden sich AI-Tools auch in tiefen Netzmodellen, darunter im Deep Learning und im *Reinforcement Learning* (deutsch auch bestärkendes oder verstärkendes Lernen). In Kapitel 4 gehe ich näher darauf ein.

Deep Learning hat besonders seit 2012 Fahrt aufgenommen. Damals wurde ein heute zu den Klassikern gehörendes Paper zum Thema Bilderkennung veröffentlicht.²

Die Anzahl der neuen KI-Algorithmen und der Veröffentlichungen zum Thema Deep Learning ist quasi explodiert (Abbildung 1.1). Besonders das exponentielle Wachstum der maschinellen Mustererkennung in gewaltigen Datenmengen fällt auf. Die Entwicklung des KI-Trainings seit 2012 wird auch in der 300.000-fachen Zunahme der pro Tag verarbeiteten Petaflops deutlich. Ein Petaflop entspricht einer Verarbeitungsgeschwindigkeit von einer Billiarde (10^{15}) Gleitkommaoperationen pro Sekunde (Abbildung 1.2).

In den letzten Jahren wurden mehrere Untersuchungen, die auf Deep Learning basieren, in führenden medizinischen Fachzeitschriften mit Peer Review veröffentlicht. Die medizinische Gemeinschaft war zu einem nicht geringen Teil von den Leistungen des Deep Learnings überrascht: So gibt es Untersuchungen, die behaupten, KI können bestimmte Arten von Hautkrebs ebenso gut oder vielleicht

sogar besser als zertifizierte Hautärzte oder bestimmte Herzrhythmusstörungen besser als Kardiologen erkennen, medizinische Scans oder pathologische Präparate ebenso gut wie erfahrene und hochqualifizierte Radiologen oder Pathologen auswerten, verschiedene Augenkrankheiten ebenso gut wie Augenspezialisten diagnostizieren und Selbstmord besser als Experten für psychische Erkrankungen vorhersagen.

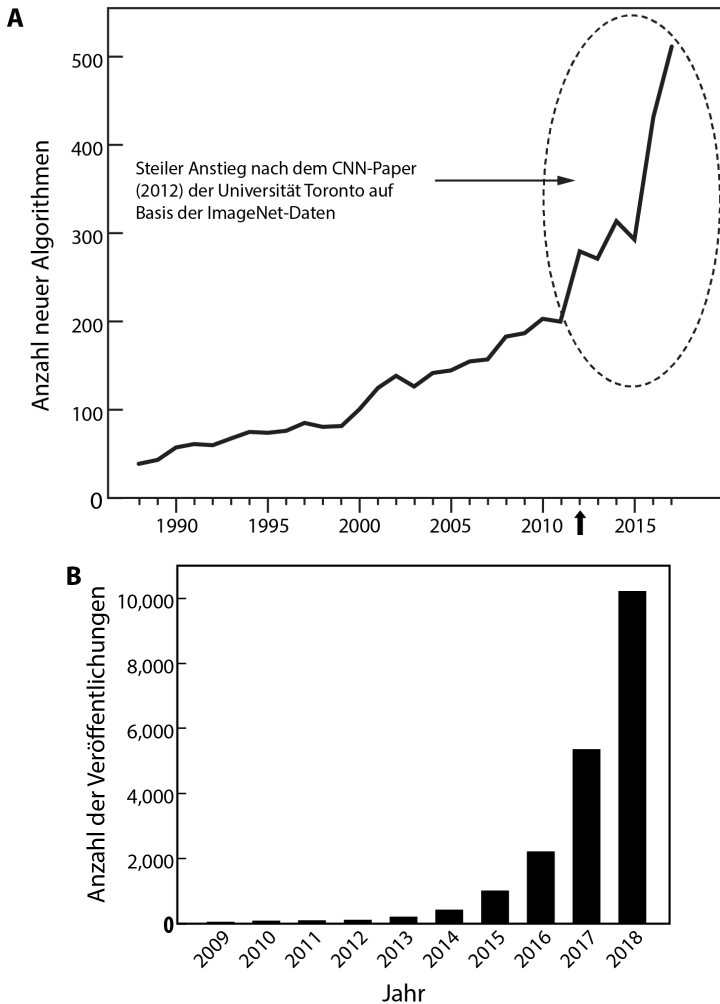


Abb. 1.1: Anzahl der KI-Algorithmen im Deep Learning seit dem Paper zur Bilderkennung im Jahr 2012. (Quellen: Bild A nach A. Mislove, »To Understand Digital Advertising, Study Its Algorithms«, Economist (2018): www.economist.com/science-and-technology/2018/03/22/to-understand-digital-advertising-study-its-algorithms. Bild B nach C. Mims, »Should Artificial Intelligence Copy the Human Brain?«, Wall Street Journal (2018): www.wsj.com/articles/should-artificial-intelligence-copy-the-human-brain-1533355265?mod=searchresults&page=1&pos=1.)

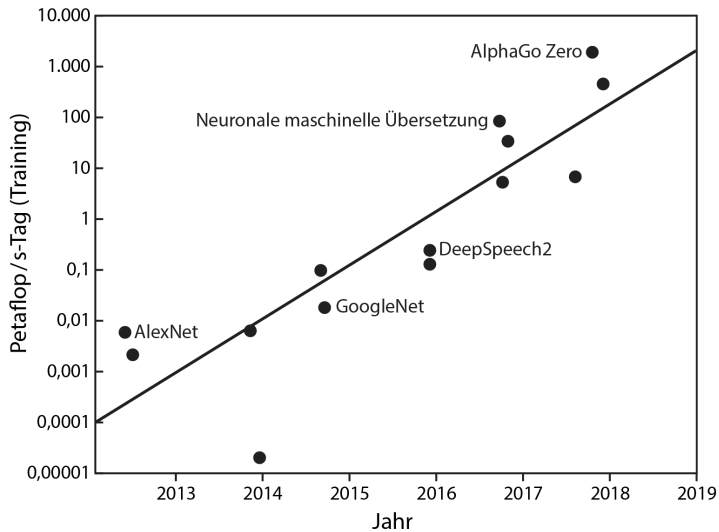


Abb. 1.2: Das exponentielle Wachstum (300.000-fach) in der Verarbeitung der größten KI-Trainingsläufe. (Quelle: nach D. Hernandez und D. Amodei, »AI and Compute«, OpenAI (2018): [https://blog.openai.com/ai-and-compute/.](https://blog.openai.com/ai-and-compute/))

All diese Fähigkeiten beruhen in erster Linie auf dem Erkennen von Mustern. Computer lernen diese Muster anhand von vielen Hunderttausend und bald vielleicht gar Millionen von Beispielen. Derartige Systeme sind immer besser geworden. Die Fehlerrate ist beim Lernen anhand text-, sprach- und bildbasierter Daten auf weit unter fünf Prozent gefallen und übertrifft damit den Menschen (Abbildung 1.3). Obschon es sicherlich eine Grenze gibt, an der kein weiterer Lernfortschritt mehr möglich ist, haben wir sie noch nicht erreicht. Anders als Menschen, die müde werden, einen schlechten Tag haben, emotional sein, an Schlafmangel leiden oder abgelenkt werden können, stehen Maschinen rund um die Uhr ohne Urlaub und Klagen zur Stelle. Einzig gewisse »Krankheiten« können auch Maschinen befallen ... Verständlicherweise kommt die Frage auf, welche Rolle Ärzte in der Zukunft noch spielen oder welche unvorhergesehenen Auswirkungen die KI auf den Arztberuf haben wird.

Ärzte in allen Bereichen übertreffen
Das nicht Diagnostizierbare diagnostizieren
Das Unbehandelbare behandeln
Das Unsichtbare auf Scans und in Schichtpräparaten sehen
Das Unvorhersehbare vorhersehen
Das Unklassifizierbare klassifizieren

Tabelle 1.1: Die absurden Erwartungen an die KI im Gesundheitssektor, ein Auszug

Ineffizienzen in Abläufen eliminieren
Stationäre Aufenthalte und Wiederaufnahmen verhindern
Den Überdross unnötiger Aufgaben eliminieren
100-prozentige Einhaltung der medikamentösen Behandlung
Keinerlei Schaden für Patienten
Krebs heilen

Tabelle 1.1: Die absurden Erwartungen an die KI im Gesundheitssektor, ein Auszug (Forts.)

Ich glaube nicht, dass Deep Learning alle Probleme der modernen Medizin heilen kann. Die Liste in Tabelle 1.1 enthält aber eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten und Bereichen, in denen ein Nutzen der KI in Aussicht gestellt wurde und noch wird. Im Laufe der Zeit werden wir dank KI-Unterstützung in all diesen Bereichen Fortschritte machen. Aber es ist kein Sprint, sondern ein Marathon ohne feste Ziellinie.

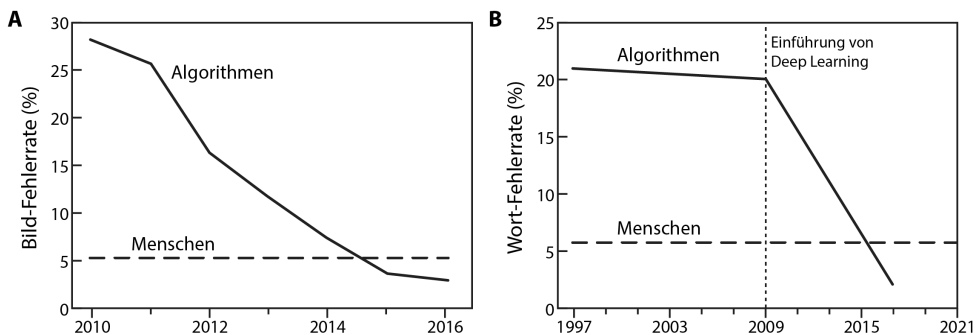


Abb. 1.3: Die zunehmende Genauigkeit der KI bei der Bild- (A) und Sprachinterpretation (B) übertrifft in genau eingegrenzten Bereichen und für von Experten gelabelte Datenmengen die menschliche Leistung. (Quellen: Bild A nach V. Sze et al., »Efficient Processing of Deep Neural Networks: A Tutorial and Survey«, Proceedings of the IEEE (2017): 105(12), 2295–2329. Bild B nach »Performance Trends in AI«, WordPress-Blog (2018): <https://srconstantin.wordpress.com/2017/01/28/performance-trends-in-ai/>.)

Die Beispiele für Deep Learning sind eng begrenzt: Eine Vorhersage zur Depressionserkrankung kann keine hautärztlichen Diagnosen ersetzen. Diese Algorithmen neuronaler Netze sind auf erkennbare Muster angewiesen – hervorragend für bestimmte ärztliche Fachgruppen, die überwiegend mit bildgebenden Verfahren arbeiten, darunter Radiologen und ihre Scans oder Pathologen und ihre Präparate. Diese Gruppen nenne ich »Ärzte mit Mustern«. Praktisch alle Kliniker haben im Alltag bis zu einem gewissen, nicht unerheblichen Maß mit Mustern zu tun, sodass auch sie von KI-Algorithmen profitieren können.

Der Großteil der veröffentlichten Beispiele für Deep Learning bietet anders als prospektive klinische Studien an Menschen nur eine *in silico* (d.h. im Computer ab-

laufende) Validierung. Diese Unterscheidung ist wichtig, denn die Untersuchung einer vorhandenen Datenmenge unterscheidet sich stark vom Datensammeln in einer echten klinischen Umgebung. Retrospektive *in silico* Ergebnisse stehen oft für das durch die rosarote Brille betrachtete Best-Case-Szenario und lassen sich bei einer vorausschauenden Bewertung nicht vollständig replizieren. Die Daten aus retrospektiven Studien eignen sich am besten zum Aufstellen einer Hypothese. Anschließend kann diese dann prospektiv getestet und gestützt werden, insbesondere bei unabhängiger Wiederholung.

Das Zeitalter der KI ist in der Medizin gerade erst angebrochen. Einige nennen es *Silicon Valley-dation*, da sich die Medizin so lange gegen den Einsatz künstlicher Intelligenz sträubte. Derart abweisende Haltungen sind in der Medizin nicht ungewöhnlich und sind für die Gemächlichkeit, mit der Änderungen ablaufen, verantwortlich. Das sieht man deutlich: Während in vielen Gebieten die auf der KI fußende vierte industrielle Revolution bereits im vollen Gange ist, hinkt die Medizin hinterher und steckt in der Anfangsphase der dritten Revolution fest – also beim verbreiteten Einsatz von Computern und Elektronik (Abbildung 1.4). Ein Beispiel: MP3-Dateien lassen sich heute praktisch auf jedem beliebigen Abspielgerät wiedergeben. Doch in der Medizin gibt es noch immer kein weit verbreitetes und anwenderfreundliches Format für elektronische Akten.

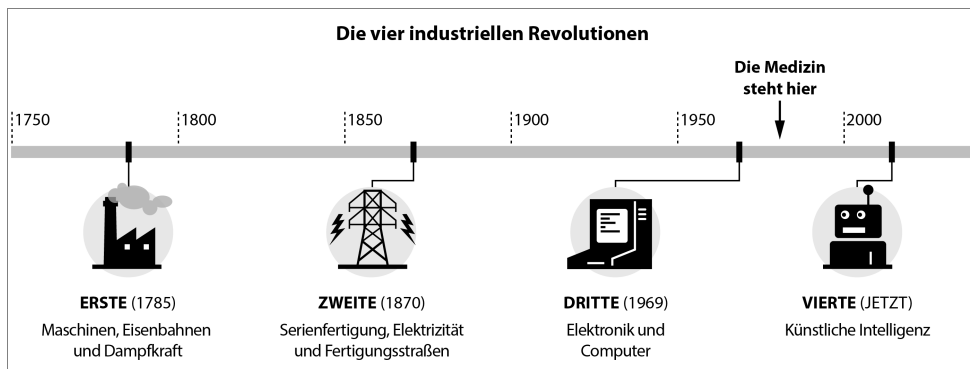


Abb. 1.4: Die vier industriellen Revolutionen. (Quelle: nach A. Murray, »CEOs: The Revolution Is Coming«, *Fortune* (2016): <http://fortune.com/2016/03/08/davos-new-industrial-revolution>.)

Ich weise hier nicht zum ersten Mal darauf hin, wie schwer sich die Medizin damit tut, neue Technologien zu nutzen. Dies ist bereits mein drittes Buch zur Zukunft der Medizin. In *Creative Destruction of Medicine* habe ich gezeigt, wie wir mithilfe von Sensoren, Sequenzierung, Bildgebung, Telemedizin und vielen anderen technologischen Chancen den Menschen digital erfassen und einen digitalen Wandel in der Medizin auslösen konnten. In *The Patient Will See You Now* habe ich Argumente dafür geliefert, wie die Medizin demokratischer werden kann. Ich habe die

Behauptung aufgestellt, dass die Bevormundung mit der Zeit enden würde, da die Verbraucher und Patienten nicht einfach nur Informationslieferanten sind, sondern ihnen diese Daten auch gehören und sie einen weitaus umfassenderen Zugriff auf ihre medizinischen Daten erhalten würden und letztendlich (so sie sich dafür entscheiden) wesentlich mehr Verantwortung für ihr Wohlbefinden und ihre Betreuung übernehmen könnten.

Das vorliegende Buch steht für die nächste Phase, das dritte »D« nach Digitalisierung und Demokratisierung. Zugleich ist es auch das tiefgreifendste dieser drei. Welchen Eindruck Sie auch von meinem Interesse an neuen Technologien gewonnen haben mögen: Ich habe schon immer davon geträumt, mich für das so wichtige menschliche Element im Arztberuf einzusetzen und es zu fördern. Dieses dritte »D« des Deep Learnings stellt ein Gerüst zur Verfügung, an dem die medizinischen Wurzeln wachsen können: die Mensch-Mensch-Beziehung. Noch sind weder Digitalisierung noch Demokratisierung in der Medizin umgesetzt, aber es gibt langsame Fortschritte zu beobachten. Ich bin überzeugt davon, dass wir diesen Wandel vervollständigen und dabei die KI zu einem zentralen Bestandteil der Heilkunst machen werden. Den Höhepunkt dieses Prozesses nenne ich *Deep Medicine*.

Deep Medicine selbst besteht aus drei Bausteinen mit dem D (Abbildung 1.5):

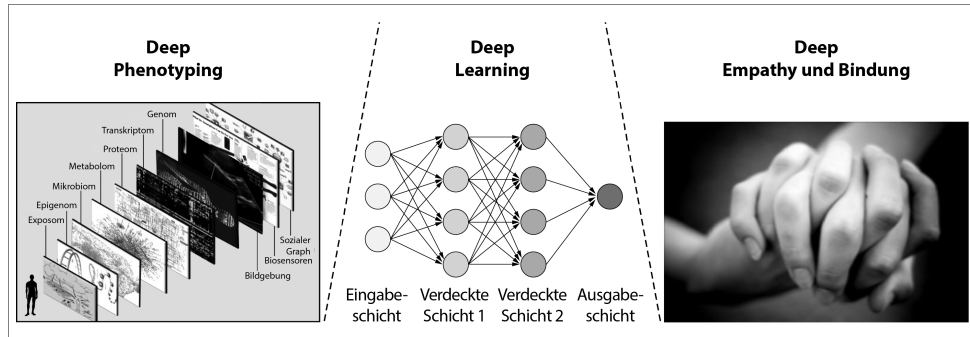


Abb. 1.5: Die drei Hauptkomponenten des Modells der Deep Medicine. (Quelle (linker Teil): nach E. Topol, »Individualized Medicine from Prewomb to Tomb«, *Cell* (2014): 157(1), 241–253.)

Zunächst ist da die Fähigkeit, jeden Einzelmenschen anhand aller relevanter Daten tiefgehend zu beschreiben, also die medizinische Essenz eines menschlichen Wesens zu digitalisieren. Zu diesen Daten können die medizinische, die soziale, die verhaltensbezogene und die familiäre Vorgeschichte gehören, aber auch die eigene Biologie: Anatomie, Physiologie und Umwelt. Unsere Biologie ist vielschichtig: DNS-Genom, RNS, Proteine, Metaboliten, Immunsystem, Mikrobiom, Epigenom und vieles mehr. In der biomedizinischen Forschergemeinde wird hier

häufig der Begriff *Deep Phenotyping* oder *tiefe Phänotypisierung* verwendet. Ein Beispiel dafür haben Sie schon kennengelernt, den Säugling mit *status epilepticus*. Deep Phenotyping erstreckt sich über so viele Arten von Daten, wie Sie sich vorstellen können, und unser gesamtes Leben, denn viele der hierbei interessanten Kriterien sind dynamisch und ändern sich kontinuierlich. Vor ein paar Jahren habe ich geschrieben, dass wir medizinische Daten »von der Empfängnis bis zum Grab« (engl. *from prewomb to tomb*) benötigen.³ Ich denke, das verdeutlicht das Konzept komplexer raum-zeitlicher Daten eindrucklich.

Als Zweites ist da das Deep Learning, das eine große Rolle in der Zukunft der Medizin spielen wird. Es geht nicht nur um Mustererkennung und Machine Learning als Grundlage der Diagnose, sondern um viele weitere Anwendungen, darunter virtuelle medizinische Trainer, die uns Menschen dabei unterstützen, auf Gesundheit und Wohlbefinden zu achten. Im Krankenhaus werden mit maschinellem Sehen die Sicherheit der Patienten und die Qualität insgesamt optimiert. Letztendlich wird man auf Krankenzimmer verzichten können, weil die Überwachung in den eigenen vier Wänden stattfinden kann. Obwohl die Ergebnisse des Deep Learnings im Arztberuf erhebliches Potenzial haben und immer offenkundiger werden, stehen wir doch erst am Anfang. Vor nahezu fünfzig Jahren veröffentlichte William Schwartz im *New England Journal of Medicine* den Artikel *Medicine and the Computer*.⁴ Er spekulierte, dass Computer und Ärzte in Zukunft »häufig miteinander sprechen und der Computer durchweg Notizen zum Verlauf, zu den Ergebnissen der Untersuchungen, zu Labordaten usw. anlegt, den Arzt auf die wahrscheinlichsten Diagnosen hinweist und eine angemessene, sichere Behandlung empfiehlt«. Was haben wir fünfzig Jahre später vorzuweisen? Überraschenderweise kaum etwas. Gewiss gibt es Anekdoten darüber, wie eine Google-Suche bei einer komplizierten Diagnose geholfen hat, aber das einfache Nachschlagen von Symptomen wurde nicht als fundiertes Diagnosehilfsmittel bestätigt. Vielmehr führt dies häufig zu Ungewissheit, Angst und Cyberchondrie.

KENNZAHL	1975	HEUTE
Arbeitsplätze im Gesundheitswesen	4 Millionen	> 16 Millionen (größter US-Wirtschaftszweig)
Gesundheitsausgaben pro Person	550 \$/Jahr	> 11.000 \$/Jahr
Zeit für Praxisbesuche	60 min Erstbesuch, 30 min Kontrollbesuch	12 min Erstbesuch, 7 min Kontrollbesuch
Anteil Gesundheitswesen am Bruttoinlandsprodukt	< 8 %	18 %

Tabelle 1.2: Ausgewählte Kennzahlen für das Gesundheitswesen in den USA, die sich in den letzten 40 oder mehr Jahren verändert haben

KENNZAHL	1975	HEUTE
Tageskosten Krankenhausbett (Durchschnitt)	ca. 100 \$	4.600 \$
Verschiedenes	Nichts	Abrechnungssystem für medizinische Leistungen (RVU), elektronische Krankenakte, Berechnungstools im Gesundheitswesen (IQWUG), Gesundheitswesen

Tabelle 1.2: Ausgewählte Kennzahlen für das Gesundheitswesen in den USA, die sich in den letzten 40 oder mehr Jahren verändert haben (Forts.)

Man kann sich vorstellen, dass die KI die Medizin von all ihren Leiden erlösen wird, darunter ungenaue Diagnosen und ineffiziente Abläufe (zum Beispiel bei Abrechnung und Codierungen), aber bis jetzt ist noch nichts davon Realität. Für Unternehmer bietet sich eine außergewöhnliche Gelegenheit, um mit Klinikern, Computerwissenschaftlern und Forschern in anderen Disziplinen (wie Verhaltenswissenschaft und Bio-Ethik) zusammenzuarbeiten und so KI und Gesundheitswesen auf die richtige Art und Weise miteinander zu verweben.

Den dritten und wichtigsten Baustein nenne ich *Deep Empathy*, eine tiefe Empathie und ein Verständnis, eine Bindung zwischen Patient und Arzt. In den mehr als vier Jahrzehnten seit Beginn meines Medizinstudiums war ich Zeuge eines Rückgangs der menschlichen Facette in der Medizin (siehe auch Tabelle 1.2). In dieser Zeitspanne ist aus dem Gesundheitswesen nicht nur irgendein Big Business geworden, sondern Ende 2017 sogar das größte Business überhaupt. Es ist heute der größte Arbeitgeber Amerikas und hat sogar den Einzelhandel überflügelt. Die Gesundheitsausgaben sind in jeder Hinsicht explodiert. Und trotz der vielen Beschäftigten und der Pro-Kopf-Ausgaben haben Ärzte immer weniger Zeit für ihre Patienten – ob in der Praxis oder im Krankenhaus. Ärzte haben zu viel zu tun. Für völlig überzogene 5.000 Dollar pro Tag im Krankenhaus sieht man den Arzt nur ein paar Minuten lang – und auch die werden gesondert in Rechnung gestellt. Ärzte hatten so viel mit der Patientenbetreuung zu tun, dass sie die Veränderungen im Gesundheitswesen einfach ignoriert haben, darunter die Einführung elektronischer Krankenakten, Managed Care sowie die Organisation von Krankenkassen und Abrechnungssystemen. Mittlerweile leidet der bisher größte Anteil an Ärzten und Pflegekräften unter Burn-out und Depressionen, weil er sich nicht mehr richtig um die Patienten kümmern kann – obwohl das für viele der ausschlaggebende Punkt bei der Berufswahl war.

In der modernen Gesundheitsfürsorge mangelt es in erster Linie an Fürsorge. Uns Ärzten bleibt im Normalfall nicht genug Zeit, uns hinreichend um die Patienten

zu kümmern. Und Patienten merken, dass es an Fürsorge ihnen gegenüber mangelt. Schon 1927 schrieb Francis Peabody: »The secret of the care of the patient is caring for the patient.«⁵ (Das Geheimnis der Fürsorge ist es, sich um den Patienten zu sorgen.) Die größte Gelegenheit, die die KI bietet, ist nicht eine Reduzierung von Fehlern oder der Arbeitslast oder ein Heilmittel gegen Krebs. Es ist die Gelegenheit, die kostbare und so sehr geschätzte Bindung und das Vertrauen zwischen Patienten und Ärzten – den menschlichen Kontakt – wiederzubeleben. Durch die miteinander verbrachte Zeit wäre eine sehr viel eingehendere Kommunikation und der Aufbau einer tieferen Beziehung möglich. Gleichzeitig könnten wir auf ganz neue Weise an die Auswahl und Ausbildung von Ärzten herangehen. Wir feiern »brillante« Doktoren seit Jahrzehnten. Doch mit dem Einzug der Maschinen schaffen wir für alle Kliniker die Grundlage für bessere Diagnosemöglichkeiten und einen umfassenden Fundus medizinischen Wissens. Im Laufe der Zeit werden alle Ärzte KI und Algorithmen im Arbeitsalltag nutzen. Indem wir das medizinische Wissen überall verbreiten, können wir uns einem neuen Mehrwert widmen: Der Suche nach und der Ausbildung von Ärzten, die sich durch besondere emotionale Intelligenz hervortun. Mein Freund und Kollege Abraham Verghese, den ich als einen der größten Humanisten in der Medizin schätze, hat diese so wichtigen Punkte im Vorwort dieses Buches bereits betont. Falls Sie es nicht sorgfältig gelesen haben, sollten Sie dies jetzt nachholen. Es fasst gut zusammen, welchen Nutzen Deep Medicine bietet.

Um den konzeptuellen Rahmen für Deep Medicine zu schaffen, möchte ich zuerst zeigen, wie die medizinische Praxis heute aussieht und warum wir dringend neue Lösungen für Probleme wie Fehldiagnosen, Fehler, schlechte Ergebnisse und aus dem Ruder laufenden Kosten benötigen. Dabei spielt auch die Art der Diagnosefindung eine Rolle. Um den Nutzen und die Risiken der KI besser zu verstehen, werde ich mit Ihnen Präzedenzfälle erkunden. Dazu befassen wir uns mit Spielen, aber auch mit selbstfahrenden Autos. Ebenso bedeutsam – wenn nicht sogar noch wichtiger – ist eine Untersuchung der Haftungsfragen rund um die KI: menschliche Vorurteile oder Neigungen, die mögliche Zementierung oder Verstärkung von Ungleichheiten, die Black-Box-Funktion und Bedenken hinsichtlich Datenschutz und Sicherheit. Die Weitergabe von zig Millionen persönlichen Daten von Facebook an das Unternehmen Cambridge Analytica, das dann eine KI auf Einzelpersonen ansetzte, führt uns deutlich vor Augen, was hier schief laufen kann.

Anschließend können wir uns der neuen Medizin widmen, die sich die KI zunutze macht. Wir untersuchen, wie die Mustererkennung die Arbeit von Radiologen, Pathologen und Dermatologen verändern wird, also der Ärzte mit Mustern. Doch

die KI wird sich auf alle medizinischen Disziplinen auswirken, »Kliniker ohne Muster« und Chirurgen eingeschlossen. Ein Bereich, der besonders von neuen Ansätzen profitieren wird, ist die psychische Gesundheit, denn hier ist die Diskrepanz zwischen der enormen Belastung beispielsweise durch Depressionen und der begrenzten Anzahl von Fachleuten, die bei derartigen Erkrankungen Hilfe leisten oder ihnen vorbeugen können, besonders eklatant. Deshalb dürfte die KI gerade auf diesem Gebiet eine wesentliche Rolle spielen.

Doch die KI und insbesondere das Deep Learning wird nicht nur den Arztberuf verändern. Quasi nebenher wird es auch zu einem Wandel in der biomedizinischen Wissenschaft kommen, zum Beispiel bei der Suche nach neuen Medikamenten. Mit KI können Erkenntnisse aus komplexen Datenmengen gewonnen werden: Millionen vollständiger Genomsequenzen, die Feinheiten des menschlichen Gehirns oder die integrierte Übertragung der Daten von mehreren Biosensoren zur Echtzeitanalyse. Diese Anstrengungen haben zunächst nichts mit der eigentlichen Patientenbetreuung zu tun, aber natürlich wirkt sich die Essenz aus Fortschritten in der Grundlagenforschung und Arzneimittelentwicklung stark auf das Gesamtfeld aus.

KI kann auch andere Lebensbereiche revolutionieren, die einem Klinikbesuch in irgendeiner Weise vorgeschaltet sind. Unsere Ernährung sticht dabei hervor. Zu den unerwarteten und praxistauglichen Errungenschaften des Machine Learnings gehört aktuell die Schaffung einer wissenschaftlichen Basis für individuelle Ernährungsweisen. Das dürfte ein spannendes Thema sein: Wissen, welche Nahrungsmittel im Einzelnen für eine ganz bestimmte Person am besten sind. Wir können bei Gesunden ohne Diabetes vorhersagen, welche Nahrungsmittel zu einem Anstieg des Blutzuckers führen werden. Derartige Fortschritte sind allgemeinen Ernährungsempfehlungen für alle Menschen deutlich überlegen. Denn weder die klassische Ernährungspyramide noch Mode-Diäten wie Atkins oder South Beach fußen auf einer soliden, evidenzbasierten Grundlage. Wir werden uns beim Thema der künftigen intelligenten Ernährung mit faszinierenden Daten und Prognosen befassen. Viele dieser Dinge, die man selbst anpacken kann, werden Teil eines virtuellen medizinischen Trainers oder Beraters sein. Ein solcher Trainer dürfte eher per Sprache gesteuert werden – ähnlich Siri, Alexa und Google Home –, aber vermutlich nicht wie eine Blechdose oder eine Zickzacklinie auf einem Bildschirm aussehen. Ich vermute ja, dass es eine Art virtueller menschlicher Avatar oder ein Hologramm sein wird oder, je nach persönlichen Vorlieben, auch ein Text-Interface oder eine E-Mail-Nachricht. Der virtuelle medizinische Trainer ist die Ausprägung des Deep Learnings für alle Daten einer Person, zentral gesammelt, ständig auf den neusten Stand gebracht, mit allen biomedizinischen Erkenntnissen verknüpft und in der Lage, Rückmeldungen und Empfehlungen zu geben. Derartige Systeme werden zu Beginn auf bestimmte Krankheitsbilder zu-

geschnitten sein, zum Beispiel auf Diabetes oder Bluthochdruck. Doch irgendwann werden sie zu einer Gesundheitsplattform wachsen, mit der jeder Mensch Krankheiten vorbeugen oder sie besser im Griff haben kann.

Eine solche Macht birgt natürlich auch die Gefahr des Datenmissbrauchs. Ich spreche da nicht nur von den offensichtlichen Dingen wie Cyber-Diebstahl, Erpressung (Krankenhäuser müssen für eine Entschlüsselung von Daten zahlen) und Hacking, sondern auch von Verkauf und Nutzung der Daten in großem Stil für üble Zwecke. Wie besorgniserregend und wirklich inakzeptabel wäre es zum Beispiel, wenn eine Versicherung oder ein Arbeitgeber all Ihre persönlichen Daten in die Finger bekäme, die Essenz des Deep Learnings über Sie, und damit für Sie lebenswichtige Entscheidungen über die Versicherungsleistungen, die Prämien oder Ihren Arbeitsplatz treffen würde! Um ein derartiges Horrorszenario zu verhindern, sind gezielte und hochgradige Anstrengungen erforderlich.

In diesem Buch geht es immer wieder darum, die Waage zwischen Patienten, Ärzten und Maschinen zu halten. Wenn wir das schaffen, also die einzigartigen Stärken der Maschinen zum Wohl einer engeren Bindung zwischen den Menschen einzusetzen, haben wir den Schlüssel zur Lösung der wesentlichen Probleme der modernen Medizin in der Hand.

Ich möchte Sie gern davon überzeugen, dass Deep Medicine sowohl möglich als auch extrem wünschenswert ist. Die Macht der Menschen und der Maschinen – menschliche und Künstliche Intelligenz im Gespann – würde der Medizin zu ungeahnten Höhenflügen verhelfen. Doch bis dahin haben wir noch viele Hindernisse vor uns. Der Weg ist nicht einfach, und bis zum Ziel ist es weit. Aber mit dem richtigen Wegweiser hat die Medizin eine Chance. Eine höhere Effizienz und verbesserte Abläufe könnten entweder dazu genutzt werden, Klinikern noch mehr abzuverlangen als bisher, oder aber dazu, den Patienten endlich wieder mehr Zeit zu schenken und so mit den Mitteln der Zukunft die positiven Aspekte der Vergangenheit neu zu erwecken. Hierfür müssen Menschen, und insbesondere Kliniker, aktiv werden und für die Interessen der Patienten eintreten. Wie die jugendlichen Schüler nach dem Massaker von Parkland gegen Waffengewalt auf die Straße gegangen sind, müssen auch Angehörige der Heilberufe bereit sein, sich gegen Lobbyismus und mächtige Interessenvertreter zu stellen, denn nur so kann es gelingen, die Hoheit über die Patientenbetreuung nicht wie so oft in der Vergangenheit aus der Hand zu geben. Der Aufstieg der Maschinen muss von verstärkter Menschlichkeit begleitet sein – mehr Zeit füreinander, mehr Mitgefühl und mehr Zärtlichkeit –, damit die Wörter »Fürsorge« und »Betreuung« wieder bedeutsam werden. Das Ziel muss sein, diese Fürsorge wiederherzustellen und zu fördern. Ohne Wenn und Aber.

Machen wir uns ans Werk!

Index

A

Abhörwanze 237
Abstammung 137
Affordable Care Act 116, 187
Akzeptanz 106
Alexa 82, 234
Algorithmen 120
algorithmische Auswertung 131
algorithmische Automatisierung 198
algorithmische Bildverarbeitung 115
algorithmische Radiologie 116
Algorithmus 66, 68, 73, 77, 85, 92, 103, 140, 144, 166
AliveCor 61, 145
Allen, Arthur 171
Allgemeinwohl 103
AlphaGo 74, 78, 94
AlphaGo Zero 78
altersbedingte Makuladegeneration 139
Alzheimer 58, 119
American Heart Association 218
American Medical Association 262
Aminoff, Michael 272
Ammoniakkonzentration 172
angeborene Katarakte 142
Anreize 252
App 54, 59, 81, 126, 157, 166, 222, 239
Apple Watch 61
Arbeitgeber 185
Arbeitsplätze 105, 179
Arbeitstempo 260
Arbeitswelt 105
Area Under Curve *siehe* AUC
Arrhythmie 145
Arthrofibrose 12
Artificial Intelligence *siehe* Künstliche Intelligenz
Arzneimittelforschung 198, 203
Arztbesuch 34
Ärzte mit Mustern 21, 259
Arzt-Patienten-Beziehung 271
Aspirin 30
Assistenten auf KI-Basis 234
Asthma 241
Atari 74
Attrappenversuche 168

AUC 64, 139, 178
Aufmerksamkeit 268
Augenerkrankungen 58, 138
Augenoptiker 139
Augmented Individualized Medical Support 138
augmentierte Mikroskopie 210
Ausbildung 276
Ausgabeschicht 75
Auswertung 211
Autismus 195
Automatisierung 211
 medizinischer Aufnahmen 180
Autonomiegrad 83
Avatar 156, 238, 251
Awdish, Rana 277

B

Backpropagation 71-72, 92, 205
Bacteroides dorei 223
Bacteroides stercoris 227
Bayes-Netz 18
Bayes *siehe* Satz von Bayes
Behandlungsempfehlungen 136, 140
Behandlungsmethoden 150, 190
BenevolentAI 200
Bengio, Yoshua 72
Beobachtung 269
Beobachtungsgabe 269
Beobachtungsvermögen 277
Beratungsstelle 166
Berührung 270
Betreuung 28
Beziehung
 Patient und Arzt 273
Bezos, Jeff 234
Bias 49, 96-97, 102, 278
Big Business 258
Big Data 7, 17, 44, 80, 101, 147, 243
Bildarchivierungs- und Kommunikationssysteme 111
Bildererkennung 75, 80, 92, 96, 196, 209
bildgebende Verfahren 21, 114
Bildsegmentierung 82
Bildspezialisten 143
Biocomputing 278

Bioinformatik 278
 Biologie 194
 biologische neuronale Netze 205
 Biomarker 159, 161, 163
 Biomedizin 193
 biomedizinische Forschungsergebnisse 136
 biometrische Merkmale 100
 bipolare Störungen 158
 Blackbox 94
 Blinde 236
 Blindheit 138
 Blutdruck 142, 172
 Blutfettwerte 225
 Blutzucker 222, 228
 Blutzuckerwerte 239
 Botsman, Rachel 233
 Breakout 77
 Brot 223
 Broyard, Anatole 8, 257
 Brustkrebs 38
 Brustkrebserkennung 123, 188
 Burn-out 35, 259
 Butter 218

C

Caffe 76
 Califf, Robert 8
 Camelyon Challenge 122
 Capper, David 197
 Capsule Networks 92
 Casarett, David 32
 CDSS 136
 CFR+ 79
 Charité 197
 Charon, Rita 268
 Chatbot 73, 157, 166-167, 190, 241
 chemische Verbindungen 200
 China 189
 Chin, Lynda 29, 56
 Chirurgen 151
 Cholesterin 137
 cholesterinarme Ernährung 218
 Chollet, François 91
 Choosing Wisely 33
 Christian, Brian 263
 Chromosomensatz 194
 Chronik der KI 73
 Cleverbot 157
 Clinical Decision Support Systems 136
 Cloud-Computing 76

CNN *siehe* Convolutional Neural Network
 Cognitive Computing 148
 Cognitive Kit 76
 Computerautonomie 85
 Computer-Blackbox 96
 computergenerierte Sprache 83
 computergestützte Bildanalyse 117
 computergestützte Diagnose 58
 Computer Vision 152
 Convolutional Neural Network 70, 77, 112, 115, 138
 Cortana 233
 Counterfactual Regret Minimization 79
 CRISPR 196
 Crowdsourcing 132
 CT-Aufnahme 110
 Cybersicherheit 102

D

Darm-Mikrobiom 224
 Darnell, Robert 193
 DARPA Challenge 73
 Dataismus 69
 Data Miner 105
 Data Science 203, 278
 Datenerfassung 246
 Datenmengen 76, 80, 91, 193-194
 Datenmissbrauch 28
 Datensammlung 117, 147
 Datenschutz 80, 99, 167, 237, 249, 279
 Datenschutzbedenken 101
 Datenschutz-Grundverordnung 94
 Datensicherheit 191
 DayTwo 225
 Deep Analytics 150
 Deep Blue 73-74
 DeepCare 176
 Deep Empathy 25, 279
 DeepFace 74, 99
 Deep-Heart-Machine-Learning-Algorithmus 146
 Deep Learning 8, 18, 66, 70, 72, 92, 123, 131, 176, 188, 195, 244, 278-279
 Deep-Learning-Algorithmus 66, 92, 124, 139, 174
 Deep-Learning-KI 153
 Deep-Learning-Studien 122
 Deep Learning, Buch 68
 Deep Medicine 23, 265, 280
 DeepMind 74, 78, 93, 100, 205

DeepMood 158
 Deep Patient 94
 Deep Phenotyping 24, 150, 157, 279
 Deep-SEA 194
 Deep Speech 83
 DeepStack 79
 Deep Thinking, Buch 74, 105
 DeepVariant 195
 Demokratisierung 23
 Depression 158, 160, 162, 169, 259
 diagnostizieren 162
 Dermatologie 125, 129
 Diabetes 138, 140, 215, 239
 Diabetesbehandlung 186
 Diabetesrisiko 224
 diabetische Retinopathie 138
 diabetisches Makulaödem 138
 Diagnose 111, 114, 267
 bessere 129
 Diagnose-Apps 54
 Diagnosefehler 49
 Diagnostik 53, 58, 122, 125, 131, 142
 Problem 48
 diagnostische Algorithmen 120
 diagnostische Fähigkeiten 48
 diagnostischer Ansatz 47
 Diäten 27
 Diätetik 214
 Differenzialdiagnose 32, 46, 53
 digitale Pathologie 122
 digitale Phänotypisierung 169
 Digitalisierung 23, 134
 Dilemma 102
 Distanz 277
 DNS-Methylierung 197
 Doctorow, Cory 149

E

Echo 234
 Echokardiografie 143, 146
 Echokardiogramm 30
 ehrliche Signale 159
 Eid des Hippokrates 263
 Eigeninteresse 103
 Einfühlungsvermögen 262-263
 Eingabedaten 244
 Eingabeschicht 75
 EKG 143
 EKG-Analyse 144
 EKG-Pflaster 36, 144

Elefant 92
 Elektrokardiografie 143
 Elektrokardiogramm 58, 61
 elektronische Krankenakte 8, 34-35, 90, 94,
 132, 181, 247
 Defizite 133
 ELIZA 73, 156
 Embedded Learning 206
 emotionale Intelligenz 26, 276
 Empathie 257, 264, 277
 Empathie-Quotient (EQ) 265
 Entlastung 131
 Entscheidungsproblem 72
 Epilepsie 209
 Epstein, David 33
 Ernährung 213, 231
 schlechte 215
 Ernährungsberater 214
 Ernährungsempfehlungen 214, 220, 231
 Ernährungsgewohnheiten 223
 Ernährungsplan 225, 231
 Ernährungsstudie 215
 Ernährungswissenschaft 214
 Ernährungswissenschaftler 213
 Ersatzmutter 168
 Estland 250
 ETH 202
 Ethik 102
 ethische Richtlinien 104
 Existenzbedrohung 106
 Experimente 211
 experimentelle Biologie 196
 experimentelle Medikamente 203

F

Facebook 74, 166
 Face ID 80, 99
 FaceNet 99
 Face2Gene 59
 Fachliteratur 247, 279
 fahrerlose Autos 83, 102
 Fake News 99, 101
 Falsch-Negativ-Rate 113, 122
 Falsch-Positiv-Meldung 39, 246
 Falsch-Positiv-Rate 65, 113
 FDA 65, 67, 103, 139, 145
 Fehldiagnose 31, 34, 42, 47-48, 51
 reduzieren 52
 Fehlerraten 121
 Fehlfunktionen 95

Fernüberwachung 154, 184, 188
 Fernüberwachung von Patienten 188
 Fett 218
 fettarme Lebensmittel 218
 Fettleibigkeit 219
 Finnland 252
 Fläche unter der Kurve *siehe* AUC
 fMRT 163
 Forschungsergebnisse 132
 Framingham-Risikofaktoren 147
 Früherkennung 138
 Frühgeborenenretinopathie 142
 Fürsorge 9, 28, 273
 Mangel 25
 Fußgängererkennung 85

G

Gamification 252
 Gastroenterologie 150
 Gates, Bill 106
 Gaydar-Studie 97
 Gebärmutterhalskrebs 188
 Gefahren der KI 95
 Gefühle 159
 Gehirn 204
 Funktionsweise 208
 Lernvermögen 91
 verstehen 205
 Gelenkversteifung 12
 Gemütszustand 160, 167
 Gendatenbanken 100
 General Artificial Intelligence 71
 Generative Adversarial Networks 70, 99, 170
 generelle Künstliche Intelligenz 107
 Genomauswertungen 188
 Genom-Bearbeitung 196
 Genomik 194
 Genomsequenzierung 14, 240
 Genschere 196
 Gesamtmortalität 216
 Geschwulst 38, 126
 Gesellschaft 257
 Gesichtserkennung 80, 83, 99
 Gesichtsmerkmale 81
 Gespräch 267
 gesunder Menschenverstand 92
 Gesundheitsausgaben 25, 40, 180
 Gesundheitsdaten 248
 Gesundheitsfürsorge 174
 Gesundheits-KI 190

Gesundheitswesen 258
 Gewebeprobe 122
 Gewicht 218, 230
 Gewichtsabnahme 240
 Gitterzellen 204
 Glossar der Künstlichen Intelligenz 70-71
 Glücklichkeit 169
 Glukosemessung 239
 Glukosereaktion 222
 Glukosespitzen 225
 Glukoseüberwachung 186
 Glukosewerte 221, 227
 Glukotypen 225
 glykämische Reaktion 221, 224
 Vorhersage 222
 Go 78, 94
 GOFAI 77
 Goldman, Brian 250
 Goodfellow, Ian 68, 99
 Google Assistant 233
 Google Street View 101
 GPS 204
 Grafikprozessoren 76
 Großbritannien 190
 Ground Truths 63, 66, 90, 145, 175
 Grundlagenforschung 194
 grüner Star 140

H

Hackerangriffe 95, 102, 237, 249
 Handhygiene 183
 Happimeter 168
 Harari, Yuval Noah 58, 69, 168
 Harnleitersteine 109
 Hassabis, Demis 74
 Hautkrankheiten 129
 Hautkrebs 75, 126
 Hawking, Stephen 106
 Hebb-Regel 207
 Herzchirurgen 143
 Herzinfarkt 33, 50, 137, 144, 170, 220
 Herzkrankheiten 215
 Herz-Kreislauf-Erkrankungen 216
 Herz-MRTs 146
 Herzrhythmusstörung 58, 61
 Herzspezialisten 143
 Hilflosigkeit 264
 Hinton, Geoffrey 72, 92, 188
 Hippocampus 204
 Hippokrates 214

Hirnforschung 203
 Hochreiter, Sepp 73
 Homo Deus 69, 98, 168
 honest signals 159
 HumanDx-App 55
 Humanisten 277
 humanistische Revolution 168
 Human Touch 151, 270
 Huxley, Aldous 11, 257
 Hypertonie 34

I

IBM 55, 73, 132, 147
 iCarbonX 246
 ImageNet 74, 80
 Immunstörungen 224
 Immunsystem 244
 individuelle Ernährung 231
 individuelle Risikoauflklärung 252
 Industrielle Revolution 22, 61
 Infektionskrankheiten 181
 Informatik 204
 Insel, Tom 155
 in silico 21, 93
 in-silico-Labeling 210
 Instagram 160
 Insulin 222
 intelligente Ernährung 27
 Intelligenz der Masse 55

J

Jeopardy! 74, 132

K

Kahneman, Daniel 45
 Kalium 172
 Kaliumgehalt 61
 des Bluts 62
 Kalorie 219
 Kamera 85
 Kaplan, Jerry 105
 Kardiologen 143
 Kasparow, Garri 73, 105, 131
 Katarakte 142
 Katzenvideos 74
 Kelm, Zak 265
 Keys, Ancel 218
 Khosla, Vinod 109
 KI 7

Behandlung psychischer Erkrankungen
 168
 Einsatzmöglichkeiten 179
 Ethik 104
 Fortschritt 102
 Gefahr 106
 Grenzen 107
 Probleme 89
 Risiken 89
 Sicherheit 104
 Verzerrungen 98
 KI-Algorithmen 19, 67, 143
 KI-Anwendung
 für die Gesundheit 231
 KI-Arzneimittelforschung 201
 KI-Assistenten 234, 243
 KI-Coach
 Entwicklung 246
 KI-Diagnose 58
 KI-Einsatz
 im Gesundheitswesen 184
 KI-Entwicklung 190
 Kierkegaard, Søren 6
 KI-gestützte Bilderkennung 243
 KI-gestützte Krebsforschung 197
 KI-gestützte Medizin 96
 KI-gestützte Operationen 151
 KI-Hilfsmittel 148
 KI-Klassifizierung von Krebs 197
 KI-Mustererkennung 183
 Kindersterblichkeit 42
 KI-Revolution 61
 KI-Sprachplattform 236
 Kissinger, Henry 106
 KI-Tools 144
 KI-Winter 72, 89
 Klassifikationsrate 144, 146, 160, 165
 Klassifizierung 80, 115, 127
 Kliniker ohne Muster 27, 131
 klinische Studien 196
 Kniegelenksprothese 11
 kognitive Verhaltenstherapie 166
 kognitive Verzerrung 49, 52
 Kohlehydratgehalt 215
 Kohlenhydrate 227
 Kohortenstudie 98
 Kommunikation 279
 Kommunikationsmodell 274
 Komplikationen 96, 153
 Kontakt mit Patienten 118

Kopfrichtungszellen 204
körperliche Untersuchung 270, 278
Körperlichkeit 270
Korrektklassifikationsrate 126, 144
Kosten 40
Kostensenkung 185
Kostenübernahme 185
Krakauer, John 193
Krankenhauseinweisungen 260
Krankenhausinfektionen 181
Krankenhauskeime 260
Krankenversicherungen 185
Krebs 58, 147, 196, 240
Krebsbehandlung 258
Krebsforschung 149, 197
Krebsmedikamente 40
Krebsrisiko 219
Krebs-Screening 37
Krebszellen 147
Kreislauf 217
Künstliche Intelligenz 7, 17, 53, 70, 73, 105,
190, 233, 263
in der Heilkunde 17
in der Medizin 14
künstliches neuronales Netz 203, 206, 209

L

Laborwerte 137
Langlebigkeit 42, 120
Langzeit-EKG 31, 144
Läsionen 127
Erkennung 151
Lebenserwartung 42, 175
Lebensmittel 213
Lebensmittelpyramide 220
Lebererkrankung 177
Lebertumore 115
LeCun, Yann 72, 89, 106
Lee, Kai-Fu 61
Lefkowsky, Eric 149
Leid 264
Leistungsfähigkeit 264
lernendes Gesundheitssystem 191
Lernprozess
menschlicher 91
Libratus 74, 79
LiDAR 85
Literaturrecherche 211
Li, Fei-Fei 74, 80, 89
Lobbyismus 28, 262
Loch im Herzen 29

Locke, John 91
Lungenentzündung 96
Lungenerkrankung 241
Lungenfibrose 17
Lungenherde 115
Lungenkrebs 117
Lungenprobleme 241
Lyrebird 99

M

Machine Learning 18, 54, 70, 72, 114, 152, 193,
235
Machine-Learning-Algorithmus 15, 165
Magnetresonanztomografie 146, 163
Makuladegeneration 139
Makulaödem 138
Mammografie 36, 114, 121
Manipulation 99
Margarine 218
Marr, David 208
maschinelle Diagnosen 115
maschinelles Sehen 182-183
maschinelle Übersetzung 237
Maschinenethik 102
Maschinenmedizin 279
Mayo Clinic 62, 114
Mazzotti, Massimo 69
McCarthy, John 72
McCulloch, Warren 72
Medicare 32
Medikamente 41
Nutzen 41
Medikamententests 201
medizinische Aufnahme 114
medizinische Bildgebung
KI-gestützt 115
medizinische Daten 44, 279
medizinische Diagnose 47
medizinische Fachkräfte 153
medizinische Forschung 98
medizinische Hochschulen 277
medizinische KI 94, 188
Potenzial 191
medizinische KI-Betreuer 239
medizinische Praxis 26
medizinischer KI-Coach 246
medizinischer Lehrplan 278
medizinischer Sprachassistent 251
Melanome 126
Menschenverstand
gesunder 92

menschliche Bindung 268-269, 275
 Menschlichkeit 263, 276, 279
 Mensch-Maschine-Zusammenarbeit 278
 Menschsein 263
 Mensch und Maschine 123
 Messgenauigkeit 160
 Metakognition 266
 Metastase 38
 Methodik 90
 Migräne 241
 Mikrobiom 195, 223
 Mikrochirurgie 151
 Mikroskop 210
 Mikroskopie 211
 Minsky, Marvin 73
 Mitgefühl 262, 274
 Molekulardiagnostik 123
 Moleküle 200
 Monte-Carlo-Suchbaum 78, 244
 Moorfields-Augenklinik 140
 Moral 103
 Münzwurf 64
 Musk, Elon 106
 Muster 58
 Erkennung von 20
 finden 163
 Mustererkennung 26, 113, 125-126, 129
 Müttersterblichkeit 42

N

Nahrung 214
 Nahrungsmittel 27, 214
 Nahrungsmittelforschung 221
 Nahrungsmittelindustrie 219
 Nahrungsmittelstudien 220
 narrative Medizin 268
 Natriumaufnahme 220
 Natural Language Processing 70
 Nearest-Neighbor-Analyse 200
 Neigungen *siehe* Bias
 Nervenzellen 206
 Netiquette 278
 Netzhaut 141
 Netzhautaufnahmen 138
 Netzhauterkrankungen 140
 Netzhautkamera 139
 Neural Networks *siehe* neuronale Netze
 neurologische Untersuchung 272
 neuromorphes Computing 208
 neuronale Deep-Learning-Netze 196
 neuronale Netze 70, 72, 90, 140, 188, 207, 278

Neuronen 72, 204
 Neurowissenschaften 203
 Neurowissenschaftler 205
 neurowissenschaftliche Forschung 206
 Ng, Andrew 66, 107, 112
 Nierenerkrankungen 62
 Nierenfunktionsstörungen 101
 Nierenkrebs 39
 Nierensteine 109, 213, 231
 NLP *siehe* Verarbeitung natürlicher Sprache
 Normalbereich 137
 Nudging 252
 nurse practitioner (NP) 179
 Nutrigenomik 221

O

Obamacare 116
 oberflächliche Medizin *siehe* Shallow Medicine
 Objekterkennung 207
 OCT-Aufnahmen 140
 OECD 42, 105
 Ofri, Danielle 274
 Omik 193
 Onkologen 147
 Open-Source-Entwicklung 76
 Optimierung von medizinischen Abläufen
 180
 Organisation für wirtschaftliche Zusammen-
 arbeit und Entwicklung 42, 105
 Ortszellen 204
 Osler, William 267
 Ösophagusvarizen 172
 Osteochondrosis dissecans 11
 Outsourcing 116
 Oxalat 213, 231
 Oxalatgehalt 213

P

Paddle 76
 Palliativpflege 174-175
 Parabacteroides distasonis 223
 Parker, Sarah 269
 Pathologie 121-122, 277
 pathologische Präparate 124
 Patienten
 Besprechung 119
 zuhören 267
 Patientenakte
 erfassen 180
 Patienten-Arzt-Beziehung 266, 273
 Patientenbetreuung 259, 278

Patientenbeziehung 267
 Patientenbindung 36, 257
 Patientendaten 101
 patientenorientierte KI 242
 Patientenüberwachung 184
 Peabody, Francis 26, 258, 275
 Peer Review 93, 132
 personalisierte Ernährung 223
 personalisierte Medizin 258
 Perzeptron 72
 Pettigrew, Lisa 213
 Pflegeassistenten 241
 Pflegeexperten 179
 Pflegekräfte 153
 Phänotypisierung 157
 Pharmaunternehmen 202
 Physiotherapie 13
 Pichai, Sundar 61
 Pitts, Walter 72
 Poker 74, 79
 Polanyi Paradoxon 73
 posttraumatische Belastungsstörungen *siehe*
 PTBS
 prädiktiver Algorithmus 177
 Präsenz 266, 279
 Predictive Policing 97
 PREDIMED-Studie 215
 Privatsphäre 99, 191, 279
 probabilistisches Denken 278
 prognostische Algorithmen 125
 Prostatakrebs 36
 Psychiatrie 155
 psychische Erkrankungen 162
 PTBS 59, 161
 PubMed 132
 PURE-Studie 216
 PyTorch 76

R

Radar 85
 Radiologie 110
 KI 116
 Zukunft 117
 räumliche Navigation 204
 Receiver-Operating-Characteristic 65, 181, 231
 Redelmeier, Donald 48
 Reinforcement Learning 70, 77-78, 182, 205,
 244
 rekurrente neuronale Netze 71
 Repräsentativitätshuristik 49
 Representation Learning 71

Reproduzierbarkeit 93
 Retinopathie 138, 188
 Richtig-Positiv-Rate 64
 RightCare Alliance 33
 Risiko 39
 Risikobewertungen 137
 Risikoprognosen 187
 RNN *siehe* rekurrente neuronale Netze
 Robie, Alice 204
 Roboter 151, 153, 211, 250
 Roboterassistenten 185
 robotergestützte Mikrochirurgie 152
 Robotik 7, 198
 ROC *siehe* Receiver-Operating-Characteristic
 Röntgenaufnahmen 110
 Röntgen-Thoraxaufnahme 77, 111
 Rosati, Robert 8
 Rosenblatt, Frank 72
 Rosenthal, David 261

S

Satz von Bayes 39, 47
 Säuglingssterblichkeit 42
 Schach 74
 Schädel-Hirn-Traumata 59
 Schicht 73, 76
 Schilddrüsenkrebs 37
 Schizophrenie 158
 Schlaganfall 66, 183
 Schmidhuber, Jürgen 73
 Schneider, Gisbert 202
 Schork, Nicholas 41
 Schwarmintelligenz 85
 Schwartz, William B. 24, 45
 Screening 37
 Screening-KI 189
 Seeing AI 237
 Sehbehinderte 236
 Sehvermögen 142
 Selbstüberschätzung 50, 52
 Sensoren 251
 Sepsis 181
 Shallow Medicine 31, 38, 43
 Sieben-Länder-Diät 218
 Silver, David 74
 Simulationen 95
 Siri 233
 Skinner-Boxen 121
 Slack, Werner 109
 Smartphone 126, 139, 146, 157, 185, 221, 234
 Smartphone-EKG 61

Smartphone-KI 239
 SmartRhythm 67
 Smartwatch 67, 168, 243
 Sodol, Lee 94
 Soft Skills 266
 sonzai-kan 263
 spezifische KI 279
 SPIKES-Kommunikationsmodell 274
 Sprachassistenten 82, 134, 180, 235, 251
 Bedenken 238
 Sprachaufzeichnung 237
 Spracherkennung 74, 82, 170, 189, 235
 sprachgesteuerte KI-Geräte 234
 sprachgesteuerte persönliche Assistenten 235
 Sprachmerkmale 158
 Sprachverarbeitung 135
 Staat 188
 Stanford University 67, 101
 Statine 137
 Status epilepticus 14
 Sterbealgorithmus 174
 Sterberisiko 119
 Stethoskop 273
 Strahlendosis 118, 181
 Studienteilnehmer 98
 Suche nach Wirkstoffen 203
 Suizidgefahr 165
 Suizidvorhersage 164
 Supercomputing 203
 Superintelligenz 106-107
 Süßstoffe 224
 Symptomdatenbanken 53
 synaptische Plastizität 207
 System-1-Denken 47

T

Talkspace 157
 Tapferkeit 274
 Tauben 121
 Taufliege 204
 Teilautomatisierung 85
 Telemedizin 67, 154, 278
 Temin Effect 269
 TensorFlow 76
 Tesla 83
 Texterkennung 82
 Thoraxaufnahmen 77
 tiefe neuronale Netze 91
 tiefe Phänotypisierung *siehe* Deep Pheno-
 typing
 tiefes Einfühlungsvermögen 279

tiefes neuronales Netz 76, 174
 Tod 174, 215
 Todeszeitpunkt
 vorhersagen 174
 Training 90
 Transfer Learning 71
 Transfer-Learning-Algorithmus 197
 transitorische ischämische Attacke 29
 Trolley-Problem 102
 Tumor 38
 Tumorboards 125
 Tumordiagnostik 148
 Turing, Alan 72-73
 T-Welle 62
 Typ-2-Diabetes 217, 239

U

Überanpassung 90
 Überdiagnostizierung 121
 Überlebensrate 39
 Übersetzung 82, 237
 überwachtes Lernen 70, 78
 Überwachung 103
 Ultraschalluntersuchungen 146
 Unaufmerksamkeitsblindheit 113
 Untersuchung 271
 Sorgfalt 272
 unnötige 32
 unüberwachtes Lernen 70
 US-Zulassungsbehörde für Medikamente und
 medizinische Produkte *siehe* FDA
 Utopie 257

V

vektorbasierte Navigation 205
 Venenkatheter 182
 Verarbeitung natürlicher Sprache 70, 73-74,
 132, 135, 157, 180, 198, 235
 Verbrechensvorhersage 97
 Verbundenheit 269
 verdeckte Schicht 75
 Verfügbarkeitsheuristik 49
 Vergheese, Abraham 9, 261
 Verhaltensänderungen 252
 Vertrauen 273
 Verzerrung 90, 96
 Videoüberwachung 182
 Viome 227
 Virtual-Reality-Umgebungen 205
 virtuelle Medizin 251
 virtuelle Pflege 184

virtuelle Realität 153
 virtueller medizinischer Assistent 13, 238-239,
 242, 251
 virtueller Mensch 156
 Vitalzeichen 154, 182
 Vorhersage-Algorithmus 231
 Vorhofflimmern 31, 66, 145
 Vorsorge 260, 279
 Vorurteile *siehe* Bias

W

Wandel der Medizin 129
 Wang, Jun 233
 Watson 55, 132, 147, 247
 WaveNet 83
 Weichenstellerfall 102
 Weizenbaum, Joseph 156
 Wiederherstellung 275
 Wissenschaft 193
 automatisieren 211
 Wissensdatenbank 132, 136
 Woebot 157, 167
 Wortwolke 35

X

Xiaoice 157

Z

Zahnmedizin 170
 Zeit
 für die Patientenbetreuung 261
 Zeitersparnis 259
 Zeitkonto 260
 Zeitmangel 271
 Zellbiologie 210
 Zio 31
 Zirrhose 173
 zirrhotische Leber 172
 Zitatangaben 211
 Zucker 219
 Zuckerberg, Mark 106, 166
 Zufriedenheit 260
 Zukunftsforscher 106
 Zuwendung 9
 Zweitmeinung 54
 zwischenmenschliche Kommunikation 133
 12-Kanal-EKG 144
 3D-Videomikroskopie 153
 7 Cups 157