

Daniel C. Dennett

TURINGS SELTSAME UMKEHRUNG DER ARGUMENTATION

Was uns Darwins Evolutionstheorie über Künstliche
Intelligenz verrät.

Manche der größten und revolutionärsten Errungenschaften der Wissenschaft werden auf eine angenehm bescheidene Weise und ohne viel Aufhebens präsentiert. So gelingt es Charles Darwin, die Kernessenz seiner Theorie in einer Art und Weise zusammenzufassen, die auch für Laien in all ihren Einzelheiten verständlich ist:

Wenn die Lebewesen unter wechselnden Lebensbedingungen in fast allen ihren Teilen individuelle Unterschiede aufweisen (was nicht bestritten werden kann), und wenn unter ihnen infolge ihrer geometrischen Zunahme an Zahl in irgendeinem Alter oder zu irgendeiner Jahreszeit einer harter Kampf ums Dasein stattfindet (was gleichfalls nicht bestritten werden kann), so wäre es in Anbetracht der verwickelten Wechselbeziehungen zwischen den Lebewesen, sowohl unter sich wie zu ihren Lebensbedingungen (die wiederum große, nutzbringende Unterschiede der Struktur, Konstitution und Gewohnheiten hervorrufen) Zufall, wenn niemals Veränderungen vorkämen, die für das Gedeihen dieser Wesen ebenso nützlich sind, wie wir zahlreiche Veränderungen für den Menschen nützlich werden sahen. Wenn nun Veränderungen auftreten, die jedem dieser Lebewesen nützen, so werden sicher die damit beglückten Individuen am ehesten im Kampf ums Dasein erhalten bleiben; und nach dem Prinzip der Vererbung werden sie die Neigung haben, ähnlich charakterisierte Nachkommen hervorzubringen. Dieses Prinzip der Erhaltung oder das Überleben des Tüchtigsten nannte ich natürliche Zuchtwahl.

(Darwin 1963 [1859], 184)

Auch in dem epochalen Aufsatz über die Struktur der DNS von Francis Crick und James Watson findet man einen wunderbar schlichten Abschlussatz:

Es ist unserer Aufmerksamkeit nicht entgangen, dass die von uns postulierten spezifischen Paarbildungen einen möglichen Kopier-

mechanismus des genetischen Materials unmittelbar nahelegen.
(Übersetzung von Watson & Crick 1953, 738)

Als Alan Turing im Jahre 1936 mit seinem Aufsatz über berechenbare Zahlen ein neues Feld für Wissenschaft und Technik eröffnet hat, präsentiert er mit einem sogar noch kürzeren Satz eine Ausgangsbasis für die Lösung eines der rätselhaftesten Probleme der Wissenschaft, dem Leib-Seele-Problem:

Es ist möglich, eine einzige Maschine zu erfinden, die dazu verwendet werden kann, jede berechenbare Folge zu errechnen.

(Turing 2019 [1936], 177)

Turing hat nicht nur die Intuition, dass man so eine bemerkenswerte Herausforderung meistern kann, sondern legt auch konkret dar, wie eine solche Maschine zu konstruieren ist. Dies markiert den Beginn des Computerzeitalters. Dabei sollte man nicht vergessen, dass es schon vor Turings Idee Einheiten gab, die man ‚Rechner‘, also Computer nannte - nämlich Menschen. Anstelle von Computern haben Büroangestellte, von denen sehr viele Frauen waren, mit Geduld, Stolz und ausreichenden mathematischen Kenntnissen Tag für Tag mithilfe von stundenlangen Berechnungen verlässliche Ergebnisse geliefert.

Im Ingenieurwesen, im Handel, im Militär und in anderen Bereichen waren Tausende dieser Angestellten beschäftigt und haben Tabellen für Navigation, Waffenindustrie und für andere technische Bereiche berechnet. Das Revolutionäre an Turings Idee zur Berechenbarkeit kann man besonders gut erkennen, wenn man sie Darwins Evolutionstheorie gegenüberstellt. Bevor Darwins Ideen die Welt prägten, hatten traditionelle Auffassungen eine gewichtigere Rolle als die wissenschaftliche Sicht: Das gesamte Universum, vom Erhabensten (‚dem Menschen‘) bis zum Einfachsten (Ameisen, Kieselsteine und Regentropfen), wurde als die Schöpfung von etwas noch Erhabeneren, Gott, verstanden. Dieser allmächtige und allwissende intelligente Schöpfer war dabei dem zweithöchsten Wesen auffallend ähnlich. Diese Vorstellung kann man als die *Trickle-Down*-Theorie der Schöpfung bezeichnen. Darwin ersetzt diese durch eine *Bubble-up*-Schöpfungstheorie.¹ Einer der zeitgenössischen Kritiker Darwins, Robert Beverly MacKenzie, brachte die Skepsis gegenüber einer *Bubble-up* Theorie klar auf den Punkt:

1 Die Begriffe ‚*Trickle down*‘ und ‚*Bubble up*‘ sind auch im Englischen keine geläufigen Bezeichnungen, man kann sie jedoch gut verstehen, wenn man die gängigere Bezeichnung ‚*top down*‘ und ‚*bottom up*‘ mitdenkt.

In Darwins Theorie nimmt die absolute Unwissenheit die Rolle des Schöpfers ein. Das heißt, man kann die Grundannahme der ganzen Theorie wie folgt festhalten: FÜR DAS ENTSTEHEN EINER PERFEKTEN UND SCHÖNEN MASCHINE IST KEIN WISSEN DARÜBER NOTWENDIG, WIE SIE ENTSTEHT. Genau diese Behauptung, die man nach sorgfältiger Prüfung findet, drückt in verdichteter Form die wesentliche Grundidee aus. Sie bringt die Quintessenz von Darwins Theorie auf den Punkt, der aufgrund einer seltsamen Umkehrung der Argumentation zu glauben scheint, dass absolute Unwissenheit vollends qualifiziert sei, den Platz der absoluten Weisheit in Bezug auf alle Errungenschaften der Schöpfung einzunehmen.

(Übersetzung von MacKenzie 1868)

Dies ist in der Tat eine seltsame Umkehrung der Argumentation (*strange inversion of reasoning*). Bis heute beschäftigt viele Menschen die beunruhigende Vorstellung, dass sich ein planloser, geistloser Prozess durch die Zeitalter werkelt und sehr viel subtilere, effizientere und komplexere Organismen generiert, ohne die geringste Ahnung von dem zu haben, was er tut.

Auch Turings Idee basiert auf einer bemerkenswert ähnlichen seltsamen Umkehrung der Argumentation. Vor Turing – als noch Menschen die Rechnenden (also Computer) waren – war es unabdingbar, dass diese Menschen etwas von Mathematik verstehen, damit sie ihre Arbeit verrichten konnten. Turing zeigt jedoch, dass dieses Verstehen selbst gar nicht notwendig ist: Man kann nämlich die einzelnen Berechnungsschritte, die von Menschen vollzogen werden, auf pure mechanische Aktionen herunterbrechen, deren Ausführung nicht den Hauch von Verständnis fordert. EINE PERFEKTE UND SCHÖNE RECHENMASCHINE MUSS NICHT WISSEN, WAS ARITHMETIK IST.

Sowohl Darwin als auch Turing haben auf ihre jeweils eigene Art entdeckt, dass Beherrschen ohne Begreifen (*competence without comprehension*) möglich ist.² Dies kehrt die zunächst zutiefst plausible Annahme um, nach der Verstehen die Quelle aller fortgeschrittenen Fähigkeiten sei. Worin sonst ist unsere Motivation, Kinder in die Schule zu schicken, begründet? Warum missbilligen wir die altmodischen Methoden des Auswendiglernens? Wir gehen davon aus, dass die Entwicklung der Fähigkeiten unserer Kinder auf wachsendem Verstehen beruht. Der Slogan ‚Kompetenz setzt Verstehen voraus‘ kann als ein Grundsatz der modernen Pädagogik gelten. Für uns als Homo Sapiens ist

2 Vgl. Dennett (2009): Hier wurde überarbeitetes Material für die vorhergehenden Absätzen entnommen.

das in der Regel auch die richtige Herangehensweise, wenn es um das Erlernen von Fähigkeiten geht. Ich vermute, dass dies weitverbreitete Prinzip aus der Pädagogik einer der entscheidenden Gründe für die Skepsis gegenüber der Evolutionstheorie als auch gegenüber der artverwandten Idee von Turing, der Künstlichen Intelligenz, ist. Schon der Gedanke, dass aus geistloser Mechanik so etwas wie menschliche - oder gar göttliche - Fähigkeiten hervorgehen könnte, empfinden viele als philisterhaft und abstoßend und werten es als eine Beleidigung unseres Verstandes und des Verstandes Gottes.

Führt man sich vor Augen, wie Turing in seiner Beweisführung vorgegangen ist, sieht man, dass er sozusagen menschliche Computer zum Vorbild genommen hat. Diese Menschen saßen an ihren Schreibtischen und vollzogen zuverlässig viele einfache Schritte nacheinander. Sie überprüften ihre Arbeitsschritte, notierten Zwischenergebnisse, statt sich auf ihr Gedächtnis zu verlassen, und konsultierten bei Bedarf ihre Formeln. So machten sie aus einer anfänglich beängstigend scheinenden Aufgabe eine Routine, die sie fast im Schlaf erledigen konnten. Turing zerlegt diese einfachen Schritte systematisch in noch einfachere Schritte, die das Verstehen der einzelnen Schritte obsolet macht. Wenn ein Mensch zum Beispiel Schwierigkeiten hat, die Zahl 9999999999999 von der Zahl 999999999999 zu unterscheiden, dann kann dieses Diskriminierungsproblem durch das Einführen von anspruchloseren Zwischenschritten in mehrere einfachere Probleme zerlegt werden. Auf diese Weise erstellt Turing ein Inventar von einfachen, elementaren Bausteinen, aus denen man wiederum einen universellen Algorithmus zusammensetzen kann, der in der Lage ist, jeden anderen Algorithmus auszuführen. Turing zeigt, inwiefern so ein Algorithmus einen Menschen oder einen Computer in die Lage versetzen kann, jede beliebige Funktion zu berechnen, und führt dazu aus:

Das Verhalten des Rechnenden wird zu jedem Zeitpunkt durch die wahrgenommenen Symbole und durch seinen momentanen ‚Geisteszustand‘ bestimmt. Wir gehen davon aus, daß es eine Grenze G für die Anzahl der Symbole gibt, die der Rechnende in einem Augenblick erfassen kann. Will er mehr erfassen, muß er sich einer Reihe aufeinanderfolgender Wahrnehmungsakte bedienen. [...] Die tatsächlich durchgeführte Operation wird [...] durch den Geisteszustand des Rechnenden und durch die wahrgenommenen Symbole bestimmt. Insbesondere bestimmen sie den Geisteszustand des Rechnenden, nachdem die Operation ausgeführt worden ist.

(Turing 2019 [1936], 41)

Etwas später stellt er fest:

Wir können nun eine Maschine konstruieren, die die Arbeit dieses Rechnenden tut.

(Turing 2019 [1936], 43)

An genau dieser Stelle zeigt sich, dass alle möglichen Berechnungen auf geistlose Prozesse reduziert werden können. Man kann mit den einfachen Bausteinen beginnen, die Turing isoliert hat, und daraus dann Schritt für Schritt anspruchsvollere Berechnungen aufbauen. Dadurch kann man nach und nach die Intelligenz wiederherstellen, die Turing so geschickt aus den Praktiken der menschlichen Computer herausgefiltert hat.

Aber wie steht es um die Rolle des Genies von Turing und später auch von anderen Programmierern, deren eigenes intelligentes Verstehen ganz offensichtlich die Voraussetzung dafür ist, dass durch die Verknüpfung von Turings geistlosen Bausteinen überhaupt nützliche Fähigkeiten entstehen können? Legt eine solche Abhängigkeit nicht doch wieder eine *Trickle-Down-Perspektive* auf Intelligenz nahe, nur diesmal mit Turing in der Rolle Gottes? Kein geringerer Denker als Roger Penrose hat sich skeptisch über die Möglichkeit geäußert, dass künstliche Intelligenz lediglich aus geistlosen algorithmischen Prozessen erwachsen könnte:

[I]ch glaube [...] sehr stark an die Macht der natürlichen Selektion. Aber ich sehe nicht ein, wie die natürliche Selektion von allein diejenigen Algorithmen zu entwickeln vermag, mit denen wir anscheinend bewußte Urteile über die Gültigkeit anderer Algorithmen fällen können.

(Penrose 1991 [1989], 403)

Er fährt fort und meint:

Von meiner Warte aus birgt die Evolution mit ihrem augenscheinlichen ‚Tasten‘ nach einem künftigen Zweck nach wie vor ein Geheimnis. Zumindest scheinen die Dinge sich etwas besser zu organisieren, als sie es – bloß aufgrund einer Evolution durch blinden Zufall und natürliche Selektion – eigentlich ‚sollten‘.

(Penrose 1991 [1989], 405)

Selbst wenn sich eine einzige Kaskade von natürlichen Selektionsprozessen über Milliarden von Jahren erstreckt, scheint es in der Tat unwahrscheinlich, dass dadurch eine Reihe von Nullen und Einsen erzeugt

werden könnte, die dann als Input für einen digitalen Computer einen Algorithmus für bewusste Urteile darstellt. Aber Turing hat erkannt, dass nichts den Prozess der Evolution daran hindert, sich auf zahlreichen Ebenen so zu kopieren, dass sich selbst Wahrnehmungsfähigkeit und Urteilsvermögen entwickeln. Man kann den rekursiven Ansatz, einen Computer zu entwerfen, der jeden anderen Computer imitieren kann, immer weiter bis hin zu dem Punkt wiederholen, an dem es für bestimmte Computern möglich ist, sich selbst neu zu entwerfen, und ihre Fähigkeiten so zu erweitern, dass sie selbst ihren ursprünglichen Programmierer weit hinter sich lassen. Bereits in dem klassischen Aufsatz ‚*Computing Machinery and Intelligence*‘ von 1950 (auf deutsch: *Kann eine Maschine denken?*) hat Turing erkannt, dass in der Vorstellung eines lernfähigen (nicht-menschlichen) Computers kein Widerspruch steckt:

Die Vorstellung einer lernenden Maschine mag einigen Lesern paradox vorkommen. Wie können sich die Operationsregeln der Maschine ändern? Sie sollten, unabhängig von der Vergangenheit der Maschine und unabhängig von ihren möglichen Zustandsänderungen, vollständig beschreiben, wie die Maschine reagieren wird. Insofern sind die Regeln absolut zeit-invariant. Das ist durchaus richtig. Die Erklärung dieses Paradoxons besteht darin, daß die Regeln, die beim Lernprozess geändert werden, ziemlich anspruchslos und nur von vorübergehender Gültigkeit sind. Der Leser möge dies mit der Verfassung der Vereinigten Staaten vergleichen.

(Turing 1967 [1950], 136)³

Für Turing ist klar, dass die enorme Vielseitigkeit und Variabilität menschlichen Denkens, die sich z.B. im Lernen, in der Fähigkeit zur Re-Evaluation, in der Sprache und im Problemlösen zeigt, im Prinzip aus einzelnen Bausteinen konstruierbar ist. Genau dies kann man als eine *Bubble-Up*-Theorie des Geistes bezeichnen, die den verschiedenen *Trickle-Down*-Theorien des Geistes von Denkern wie René Descartes bis John Searle (und bekannter Weise auch Kurt Gödel, dessen Beweis gleichwohl eine Inspiration für Turgings Arbeit war) entgegensteht. Letztere beginnen mit dem menschlichen Bewusstsein in seiner hoch-reflektierenden Form und sind aber dann nicht in der Lage, derart magische Kräfte mit den bloßen Mechanismen menschlicher Körper und Gehirne in Zusammenhang zu bringen.

3 Vgl. Suber (2001) bezüglich einer wertvollen Diskussion dieser Passage und des sogenannten Paradoxes der Selbstveränderung.

Genauso wie Darwin hat Turing das Geheimnis der Intelligenz (oder des intelligenten Designs) in atomistische Schritte blinder Zufälligkeiten zerlegt, die sich, wenn sie millionenfach akkumuliert werden, zu einer Art Pseudo-Intelligenz summieren. Die Zentraleinheit eines Computers weiß nicht wirklich, was Arithmetik ist, noch versteht sie, was Addition ist, aber sie ‚versteht‘ den ‚Befehl‘, zwei Zahlen zu addieren und die Summe in ein Register einzutragen, so dass sie, wenn sie zum Addieren aufgefordert wird, zuverlässig addiert und die Summe an die richtige Stelle setzt. Man kann hier von *einer Art von* Verständnis für Addition sprechen. Ein paar Ebenen höher versteht das Betriebssystem nicht *wirklich*, dass es Übertragungsfehler prüft und behebt, aber es verfügt über *eine Art von* Verstehen, das sich darin zeigt, dass es diese Aufgabe bei Bedarf zuverlässig ausführen kann. Wiederum einige Ebenen höher, wo Milliarden und Billionen Bausteine kombiniert sind, versteht ein Schachprogramm zwar nicht *wirklich*, dass seine Königin in Gefahr ist, aber es hat *eine Art von* Verständnis für diese Situation. Und auch IBMs Watson hat *eine Art von* Verständnis von den Jeopardy-Fragen, die es beantwortet.

Warum sollte man von ‚*einer Art von*‘ Verständnis sprechen? Ich halte dies für sinnvoll, weil man bei der Analyse – oder Synthese – von immer kompetenteren Ebenen einer Maschine zwei Dinge unterscheiden muss, nämlich was sie ist und was sie tut. Das ‚was sie ist‘ lässt sich in Bezug auf die strukturelle Organisation ihrer Bestandteile beschreiben, vorausgesetzt, die Teile funktionieren so, wie sie sollen. Bei dem ‚was sie tut‘ handelt es sich um eine (kognitive) Funktion, die (sozusagen) ausgeführt wird. Die Art und Weise der Ausführung ist dabei zuverlässig genug, so dass man auf der nächsthöheren Ebene die Annahme treffen kann, dass man einen intelligenteren Baustein in seinem Inventar zur Verfügung hat, der eben diese Funktion - in einer *Art von* gut genug - erfüllt. Dies ist der Schlüssel, mit dem man die verwirrend komplexe Frage, wie es möglich ist, dass ein Geist allein aus materiellen Mechanismen zusammengesetzt ist, angehen kann.

Was man in der Kognitionswissenschaft den ‚*Art von*‘-Operator nennen könnte, ist vergleichbar mit Darwins Gradualismus bezüglich evolutionärer Prozesse. Das heißt, bevor es Bakterien gab, gab es *eine Art von* Bakterien, bevor es Säugetiere gab, gab es *eine Art von* Säugetieren und bevor es Hunde gab, gab es *eine Art von* Hunden und so weiter. Genauso wie wir Darwins Gradualismus brauchen, um den großen Unterschied zwischen einem Affen und einem Apfel zu erklären, brauchen wir Turings Gradualismus, um den großen Unterschied zwischen einem humanoiden Roboter und einem Taschenrechner

zu erklären. Sowohl Affen als auch Äpfel bestehen aus den gleichen Basiselementen, die sich aber in ihrer strukturellen Anordnung so unterscheiden, dass sie auf vielen Ebenen ganz unterschiedliche Funktionen haben. Dabei gibt es keine strikte Trennlinie zwischen *einer Art von Affe* und einem Affen. Genauso bestehen humanoide Roboter und Taschenrechner aus denselben Grundbausteinen, den nicht-denkenden und nicht-fühlenden Turing-Bausteinen. Aber indem man diese Bausteine zu größeren und leistungsfähigeren Strukturen zusammensetzt, die dann wiederum auf noch höheren Ebenen zu Elementen von noch leistungsfähigeren Strukturen werden, entstehen schließlich Elemente, die eine Art von Intelligenz haben. Diese Elemente können wiederum so zusammengesetzt werden, dass eine Fähigkeit entsteht, von der wir berechtigter Weise sagen können, dass sie von Verständnis begleitet ist.

Wir nehmen den intentionalen Standpunkt (*intentional stance*) ein (Dennett 1971, 1987), um Überzeugungen und Wünsche (oder ‚Überzeugungen‘ und ‚Wünsche‘ oder *eine Art von Überzeugungen* und *eine Art von Wünschen*) aller möglichen irgendwie rational handelnden Wesen auf unterschiedlichen Ebenen zu erkennen. Dies schließt sowohl einfachste Bakterien als auch Gehirne von Lebewesen – vom Seestern bis zum Astronomen – ein, deren Schaltkreise Unterscheidungen treffen, Signale senden, Vergleiche vornehmen und über Erinnerung verfügen. Es gibt keine strikte Linie, ab der das wahre Verständnis beginnt – auch nicht in unserem eigenen Fall, dem Menschen. Ein kleines Kind hat nur *eine Art von Verständnis*, von seinem eigenen Satz ‚Papa ist Arzt‘, und ich habe nur *eine Art von Verständnis* für die Formel $E = mc^2$. Einige Philosophen widersetzen sich diesem Anti-Essentialismus: Sie behaupten, dass man entweder glaubt, dass Schnee weiß ist oder nicht und dass man entweder bewusst ist oder nicht. Nichts kann hier als eine Annäherung an ein mentales Phänomen gelten. Stattdessen wird von einer ‚Alles oder Nichts‘ Frage ausgegangen. Die Fähigkeiten des Geistes stellen für solche Denker ein unergründliches Mysterium dar, da sie ‚perfekt‘ und damit völlig anders als alles sind, was in rein materiellen Mechanismen zu finden ist.

Bisher haben Roboter noch kein ‚echtes‘ Verständnis, aber wir kommen der Sache näher. Das ist zumindest die Überzeugung derjenigen von uns, die sich von Turings Einsichten haben inspirieren lassen. Die *Trickle-Down*-Theoretiker dagegen sind felsenfest davon überzeugt, dass uns keine noch so großen Fortschritte in der Forschung jemals zu ‚echtem‘ Verstehen führen werden. Sie gehen davon aus, dass aus Turings Bausteinen kein cartesianisches *Res Cogitans*, kein denkendes Ding konstruiert werden kann. Genauso bezweifeln Kreationisten, dass die von

Darwin beschriebenen Prozesse der Mutation, Replikation und Selektion jemals (echtes) Leben erzeugen können. Damit liegen sie falsch, aber man kann das Unbehagen, das ihre Einstellung motiviert, nachvollziehen.

Sowohl Turings, als auch Darwins seltsame Umkehrung der Argumentation widersprechen jahrtausendalten Denktraditionen. Orientiert man sich an der Geschichte des Widerstands gegen das darwinistische Denken, kann man damit rechnen, dass es auch in ferner Zukunft, wenn ‚bloße Maschinen‘ all die Errungenschaften des menschlichen Denkens erreicht oder gar übertroffen haben, noch Denker geben wird, die darauf bestehen, dass der menschliche Geist aber auf eine mysteriöse Weise arbeitet, die keine Wissenschaft je verstehen kann.

(Übersetzung von Anna Strasser und Ralf Stapelfeldt)

Literatur

- Darwin, Charles (1963): *Die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl*. Übersetzung von Carl Neumann. Reclam, Stuttgart 1963. Titel der englischen Originalausgabe: *On the Origin of Species*. John Murray, London 1859.
- Dennett, Daniel (1971): Intentional systems. In: *The Journal of Philosophy* 68, 87-106.
- Dennett, Daniel (1987): *The Intentional Stance*. MIT Press, Cambridge, MA 1987.
- Dennett, Daniel (2009): Darwin's Strange inversion of reasoning. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 10061-10065.
- MacKenzie, Robert (1868): *The Darwinian Theory of the Transmutation of Species Examined*. Nisbet & Co, London 1868.
- Penrose, Roger (1991): *Computerdenken. Des Kaisers neue Kleider oder Die Debatte um Künstliche Intelligenz, Bewußtsein und die Gesetze der Physik*. Übersetzung von Michael Springer. Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg 1991. Titel der englischen Originalausgabe: *The Emperor's New Mind*. Oxford University Press, Oxford 1989.
- Suber, Peter (unpublished): Saving Machines From Themselves: The Ethics of Deep Self-Modification, preprint, 30 November 2001. <http://legacy.earlham.edu/~peters/writing/selfmod.htm>, abgerufen am 7.10.2020.
- Turing, Alan (2019): Über berechenbare Zahlen mit einer Anwendung auf das Entscheidungsproblem. In: Ziemann, Andreas (Hg.): *Grundlagentexte der Medienkultur. Ein Reader*. Wiesbaden: Springer 2019. Titel der englischen Originalausgabe: Turing, Alan (1936). On com-

putable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. In: *Proc. Lond. Math. Soc.* 42, 230-265, and erratum (1937) 43, 544-546.

Turing, Alan (1967): *Kann eine Maschine denken?* In: Enzensberger, Magnus (Hg.): *Kursbuch 8*, Band 1. Übersetzung von Gänßler, Peter. Zweitausendeins, Frankfurt, 1967, 106-138. Titel der englischen Originalausgabe: Turing, Alan (1950). Computing machinery and intelligence. In: *Mind*, LIX(2236), 433-460.

Watson, James; Crick, Francis (1953): A structure for deoxyribose nucleic acid. In: *Nature*, 171, 737-738.