HARDWIN JUNGCLAUSSEN

Von der Rechentechnik zur Wissenschaft Informatik

Vortrag gehalten auf dem Kolloquium „Information in Natur und Gesellschaft“, Dresden. 15.04.2000; abgedruckt in: Texte zur Philosophie, Heft 8, Rosa-Luxemburg-Stiftung Sachsen e.V. 2000

1. Intelligenz, Information und Informatik

Als der Schöpfer seinen Geschöpfen Intelligenz und Sprache schenkte, wollte er ihnen Gutes tun. Er wollte, daß die Menschen die Welt verstehen und daß sie sich untereinander verstehen, so daß sie sich über die Welt verständigen können. Das mußten sie nämlich, um gemeinsam den Auftrag ihres Schöpfers ausführen zu können: »Füllet die Erde und machet sie euch untertan!«

Aber der Teufel schlug dem Herrgott ein Schnippchen. Er schenkte den Menschen die Neigung, sich mißzuverstehen und zu belügen und die Erkenntnisse über die Welt nicht dafür zu benutzen, effektiver miteinander zu kooperieren, sondern effektiver sich gegenseitig zu schaden, womöglich umzubringen.

Das Gottesgeschenk könnte man moderner folgendermaßen beschreiben: Die Evolution brachte die Sprache und die Fähigkeit zum sprachlichen Modellieren der Welt hervor, weil dadurch der Informationsaustausch und die Kooperation der Menschen im Kampf ums Dasein gefördert wurden und die Überlebenschancen stiegen. Das Modell der Welt mußte und muß ein kausales Modell sein, d. h. es muß Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge beinhalten. Denn dadurch wird das für das Überleben wichtige Vorhersehen und Erfinden möglich.

Aus diesem Sachverhalt leite ich drei Definitionen ab.

– *Intelligenz* ist die Fähigkeit zum sprachlichen Modellieren.
– Eine *Information* ist eine Mitteilung über die Welt.
– *Informatik* ist die Lehre vom aktiven sprachlichen Modellieren.

Die Definitionen sind zum Teil etwas ungewöhnlich, darum folgen einige Kommentare. Das *sprachliche* oder *codierende Modell* eines Originals beinhaltet Aussagen über das Original. (Die Wörter »sprachlich« und »codierend« bzw. »codiert« verwende ich wie Synonyme.) Denken ist sprachliches Modellieren ohne Artikulieren. Eine *Aussage* ordnet einem oder mehreren Objekten ein oder mehrere Merkmale zu. Auch Tätigkeiten sind Merkmale. Das Operieren mit Merkmalen ist die Grundoperation des »Begreifens« und des sprachlichen Modellierens der Welt.

Eine Information besteht aus zwei Komponenten, einem *Code* (Zeichenkörper), z. B. einer Lautfolge oder Buchstabenfolge, und der *Bedeutung* des Codes (dem durch den Code ausgelösten Bewußtseinsinhalt oder der Interpretation des Codes). Information ist an Bewußtsein gebunden. Die Bedeutung einer sprachlichen Äußerung ist primär individueller Natur. Von *der* Bedeutung eines Wortes oder Satzes kann nur dann gesprochen werden, wenn alle Beteiligten unter dem Wort oder Satz ein und dasselbe verstehen. Mit einem Code wird nur soweit Information übertragen, wie seine Interpretation durch Sender und Empfänger übereinstimmen.

Die beiden Komponenten einer Information sind unterschiedlicher Natur, sie gehören verschiedenen Welten an. Der Code gehört der realen Welt an, der Welt 1 nach Karl Popper,[1] seine Bedeutung gehört der Welt der Vorstellungen an, der Popperschen Welt 2. Eine Information stellt gewissermaßen eine Klammer zwischen den Welten 1 und 2 oder eine Brücke über den »kartesischen Schnitt« dar.

Ich nenne ein sprachliches Modell zusammen mit seinem Träger, in dem die Prozesse des Modellierens ablaufen, ein aktives oder agierendes Modell, im Gegensatz zu einem passiven, nicht agierenden Modell. Beispielsweise ist ein Kursbuch ein passives sprachliches Modell des Zugverkehrs, ein Auskunft gebender Mensch oder Computer ist ein aktives Modell. Das innere Modell der Welt, das ein Mensch sich macht, schließt als aktives Modell den Träger, das Zentralnervensystem ein.

---

[1] Siehe Karl R. Popper: Alles Leben ist Problemlösen. Über Erkenntnis, Geschichte und Politik. München, Zürich 1996. S. 75.

Unter Intelligenz wird häufig die Fähigkeit zum Problemlösen verstanden. Das widerspricht nicht obiger Definition, denn Problemlösen beinhaltet sprachliches Modellieren und stellt insofern eine spezielle Form von Intelligenz dar. *Künstliche Intelligenz* (abgekürzt KI oder AI) ist simulierte, d. h. mit Hilfe des Computers »nachgemachte« natürliche Intelligenz.

Was sind die Früchte des Gottesgeschenkes? Was hat der Mensch aus seiner Fähigkeit zum sprachlichen Modellieren gemacht? Ein Blick in die Kulturgeschichte gibt eine klare Antwort. Das kausale Modell, daß sich die Menschen von der Welt machen, hat ständig zugenommen, es ist umfangreicher und exakter geworden. Das moderne »physikalische Weltbild« umfaßt praktisch die gesamte mit den menschlichen Sinnen unmittelbar wahrnehmbare Welt und darüber hinaus große Teile der nicht unmittelbar wahrnehmbaren Welt. Es ist bereits gelungen die Chemie auf Physik, konkret auf die Quantenmechanik zurückzuführen, und man ist dabei, die Erscheinungen des Lebens auf Chemie und damit auf Physik zurückzuführen. Wird irgendwann einmal das sprachliche Modellieren und damit Denken und Bewußtsein auf Physik zurückgeführt werden? Auf diese Frage komme ich am Ende des Vortrages zurück und möchte hier Max Planck zitieren, den Begründer der Quantenmechanik. Über das Ziel der Wissenschaft hat er folgendes gesagt: *»Denn das wissenschaftliche Denken verlangt nun einmal nach Kausalität, insofern ist wissenschaftliches Denken gleichbedeutend mit kausalem Denken, und das letzte Ziel einer jeden Wissenschaft besteht in der vollständigen Durchführung der kausalen Betrachtungsweise.«*[2] Und an anderer Stelle: *»Die Arbeit der Wissenschaft stellt sich uns also dar als ein unablässiges Ringen nach einem Ziel, das grundsätzlich niemals erreicht werden kann. Denn das Ziel ist metaphysischer Art, es liegt hinter jeglicher Erfahrung.«*[3]

Den letzten Satz, angewandt auf einige konkrete Naturerscheinungen, verstehe ich beispielsweise so: Wir werden nie wissen, was ein Elektron »wirklich« ist, was das elektro-magnetische Feld »wirklich« ist oder was Bewußtsein »wirklich« ist.

2. Schritte zur Wissenschaft Informatik

Nachdem ich erklärt habe, was im weiteren unter den Begriffen Intelligenz, Informatik und Information zu verstehen ist, möchte ich den Gedankengang des Vortrages abstecken, damit der rote Faden sichtbar wird. Abbildung 1 zeigt im oberen Teil eine Untergliederung der Informatik, wie sie im allgemeinen verstanden wird, nämlich als »Wissenschaft und Technik von der Informationsverarbeitung«. Je nachdem, ob der Träger der Informationsverarbeitung ein technisches oder ein biologisches System ist, unterscheide ich zwischen *technischer* und *biologischer* Informationsverarbeitung und zwischen *technischer* und *biologischer Informatik*. Zu den technischen informationellen Systemen gehören die traditionellen Rechner (Prozessor-Computer) und die künstlichen neuronalen Netze (Neurocomputer). Mit Neurocomputer ist ein informationelles System bezeichnet, das ein neuronales Netz darstellt oder dessen wesentlicher Bestandteil ein neuronales Netz ist. Zu den biologischen Systemen gehört das Zentralnervensystem und das genetische System. Informationsverarbeitung durch den Computer bzw. durch das menschliche Zentralnervensystem nenne ich kurz *Computer-IV* bzw. *Human-IV*.

Im mittleren Teil des Bildes ist aufgeführt, was aus der Computer-IV und der Human-IV emergiert. Mit den Wörtern *Emergenz* und *emergieren* verbindet sich die Vorstellung, daß aus komplizierten Systemen und Prozessen, die eventuell so komplex sind, daß man sie nicht durchschauen kann, neue Erscheinungen und neue Qualitäten erwachsen (das lateinische Verb *emergo* bedeutet soviel wie *auftauchen*). Die vielleicht erstaunlichste neue Qualität ist die Fähigkeit zum sprachlichen (codierenden) Modellieren. Die natürliche Intelligenz emergiert aus neuronalen Prozessen im Zentralnervensystem des Menschen. Hinsichtlich der künstlichen Intelligenz (KI) wird zwischen der sogenannten *traditionellen KI* und der *alternativen KI* unterschieden. Die traditionelle KI emergiert aus Prozessen im traditionellen Computern (Prozessorcomputern), die alternative KI aus Prozessen in künstlichen neuronalen Netzen. Was sich hinter dem »Emergieren« der KI aus den Prozessen im Trägersystem verbirgt, werde ich später versuchen, plausibel zu machen.

---

[2] Max Planck: Kausalgesetz und Willensfreiheit. In: Vom Wesen der Willensfreiheit und andere Vorträge. Frankfurt am Main 1991. S. 110.

[3] Max Planck: Positivismus und reale Außenwelt. Ebenda. S. 126.

Neuerdings tritt eine andere neue Qualität, die aus der Computer-IV emergiert, immer mehr in der Vordergrund des öffentlichen Interesses, das weltweite Kommunikationsnetz, im Bild stellvertretend durch WWW (World Wide Web) bezeichnet. Aus dem WWW und der Intelligenz der kommunizierenden Menschen emergiert die *Informationsgesellschaft*. Sie ist nicht Thema meines Vortrags.

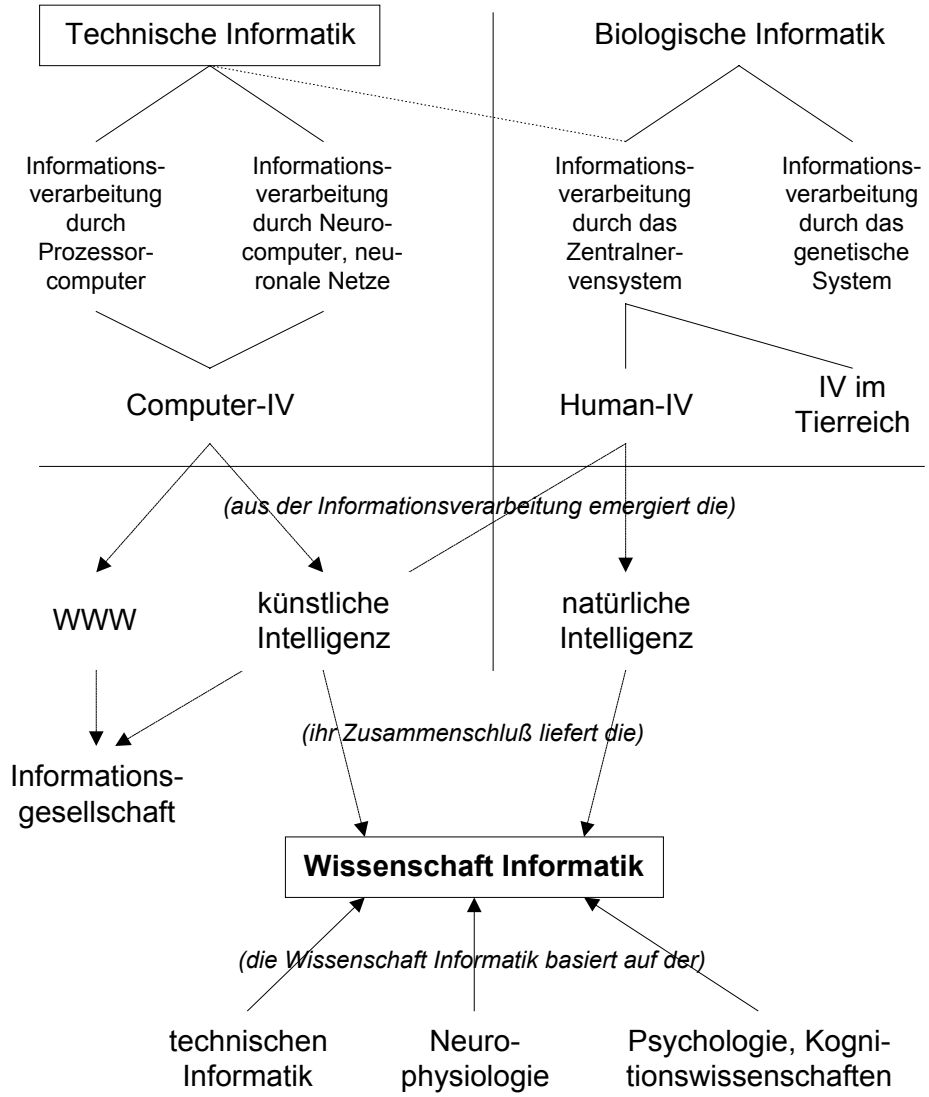

Abbildung 1: Teilgebiete und Fundamente der Wissenschaft Informatik

Der untere Teil des Bildes zeigt den Zusammenschluß von Computer-IV und Human-IV, von künstlicher und natürlicher Intelligenz (als Forschungsgebiete aufgefaßt) zur *Wissenschaft Informatik*. Ihr Gegenstand ist die Erforschung des sprachlichen Modellierens in beliebigen Trägersystemen sowie ihre technische Realisierung. Dies ist der einzige Punkt in dem Bild, der über die üblichen Vorstellungen bezüglich des Gegenstandes der Informatik hinausgeht. Wenn von *Informationsverarbeitung* die Rede ist, beispielsweise in den Medien, ist damit in aller Regel die Informationsverarbeitung durch einen *Prozessorcomputer* gemeint. Die Informatik wird dann häufig als »Technik der Informationsverarbeitung durch Computer« umschrieben, was ziemlich inhaltlos ist, wenn nicht gesagt wird, was Information ist. Aus der Sicht des oben eingeführten Intelligenzbegriffes gewinnen die Begriffe Information und Informatik einen sinnvollen Inhalt. Die so aufgefaßte »Wissenschaft Informatik« basiert auf der technischen Informatik, der Neurophysiologie und der Psychologie.

Die Informatik wird sich zwangsläufig vom oberen umrahmten Kästchen zum unteren umrahmten Kästchen in der Abbildung entwickeln, von der Technik zur Wissenschaft. Das liegt in der Natur des Menschen. Er will die Welt, in der er lebt, verstehen, um überleben zu können, und er will sie für sich ausnutzen, um angenehmer

leben zu können. Dafür benötigt er ein kausales, sprachliches Modell der Welt, und zur Welt gehört auch der Mensch mit seinen Fähigkeiten. Daß der Mensch immer versucht ist, sein Wissen nicht als Gottesgeschenk *für* die Welt und die Mitmenschen, sondern als Teufelsgeschenk *gegen* die Welt zu benutzen, auch sein Wissen über seine eigene Intelligenz und seine Fähigkeit zur weltweiten Kommunikation, ist ein Umstand, mit dem die Menschen fertig werden müssen.

Ich will an dieser Stelle einige Bemerkungen zur genetischen Information einfügen, die nicht Thema des Vortrages ist. Zur Unterscheidung von *genetischer* Information werde ich von *kommunikativer* Information im oben definierten Sinne als »Mitteilung über die Welt« sprechen. Diese Definition ist bedingt auch auf die genetische Information anwendbar, wenn sie als »Mitteilung« an den Nachkommen aufgefaßt wird. Genetische Information (die DNS) *informiert* über den Aufbau des eigenen Organismus und dient dem Nachkommen als »Bauplan«. Sie kann als dasjenige definiert werden, was in einer Evolutionskette von Glied zu Glied weitergegeben wird. Diese Definition der Information ist auch auf die kulturelle Evolution anwendbar, wenn die Kulturepochen als Glieder einer Evolutionskette aufgefaßt werden. Die genetische Information ist in der »Sprache« des genetischen Systems artikuliert und wird während des Wachstums des neuen Organismus interpretiert. Voraussetzung der genetischen wie der kulturellen Evolution ist die Codierung. In diesem Sinne kann man den Beginn des Johannisevangeliums als »Im Anfang war der Code« verstehen.

Neben den genannten Analogien gibt es einen wesentlichen Unterschied zwischen genetischer und kommunikativer Information. Im Gegensatz zur Codierung kommunikativer Information ist die Codierung der genetischen Information *nicht arbiträr*, d. h. sie ist nicht beliebig vereinbar. Offensichtlich gehört der Begriff der genetischen Information einer begrifflichen Ebene an, die unterhalb derjenigen liegt, auf der kommunikative Information ausgetauscht wird; dabei bedeutet »unterhalb« soviel wie »näher an der organismischen Basis, am stofflichen Träger liegend«. Es handelt sich um zwei Betrachtungsebenen, die als *symbolische* bzw. *subsymbolische* Ebene bezeichnet werden. Wenn von Informationsverarbeitung auf subsymbolischer Ebene gesprochen wird, verbindet sich damit die Vorstellung, daß von physikalisch-chemischen Prozessen die Rede ist. Das trifft für die Verarbeitung genetischer Information, nicht aber für die Verarbeitung kommunikativer Information zu.

3. Von den ALU-Operationen zu Denkoperationen

Ich will nun versuchen, die Ideen der Computer-IV und die Prozesse im Computer verständlich zu machen, die der traditionellen künstlichen Intelligenz zugrunde liegen. Das Herz des Computers ist der *Prozessor*, und das Herz des Prozessors ist die *ALU*, die arithmetisch-logische Einheit. Der Prozessor ist so groß wie ein Fingernagel oder kleiner. Die ALU ist mit bloßem Auge kaum zu erkennen. Sie operiert mit sogenannten Bitketten oder Binärwörtern. Die einzelnen »Stellen« der Ketten heißen Bits. Ein Bit ist eine Variable, welche die Werte 0 und 1 annehmen kann, so wie eine Ziffer die Werte 0 bis 9 annehmen kann. In einer Operation überführt die ALU entweder eine Bitkette oder ein Bitketten-Paar in eine neue Bitkette, beispielsweise 0110 in 1100 oder das Paar 0001 und 0010 in 0011. Die erste Operation ist eine Verschiebung, wobei die führende 0 am Ende wieder angehängt wird. Die zweite Operation ist die Addition der dual codierten 1 mit der dual codierten 2 zur dual codierten 3.

Um das Weitere zu verstehen, braucht man nicht zu wissen, was duale Codierung ist, denn *Codierung ist arbiträr*, d. h. sie ist *beliebig*, aber *verbindlich* festlegbar. Die Dezimalzahlen 1, 2 und 3 hätten auch durch andere Bitketten codiert werden können. Die binäre Codierung (Codierung mittels zweier Zeichen) hat den großen technischen Vorteil, daß alle Baueinheiten des Prozessorrechners aus Schaltern aufgebaut werden können, also aus Einrichtungen, die einen Stromkreis schließen und unterbrechen können. Ein Stromkreis kann sich in zwei Zuständen befinden: »Strom fließt« und »Strom fließt nicht«. Das sind die codierenden Zustände für die beiden Werte eines Bit. Die sichtbare Entwicklung der Rechentechnik von riesigen, ganze Gebäude füllenden Anlagen bis zum Computer am Armband beruht auf der Miniaturisierung der Schalter von Relais über Röhren und Transistoren bis zu winzigen Elementen mikroelektronischer Schaltungen.

Die Umcodierung von Dezimalzahlen oder auch von Wörtern einer natürlichen oder künstlichen Sprache läßt sich stets durch eine geeignete Schaltung realisieren. Wir brauchen im weiteren also keine Rücksicht darauf zu nehmen, daß alles, was dem Computer eingegeben wird (Daten, Programme) binär umcodiert wird, bevor es intern verarbeitet und gespeichert werden zu kann.

Aus den wenigen Operationen, welche die ALU ausführen kann (auf die sie durch Eingabe eines Operationscodes eingestellt oder *konditioniert* werden kann), lassen sich mit Hilfe von sogenannten Maschinenprogrammen kompliziertere Operationen *komponieren*. Ein *Maschinenprogramm* ist eine Folge von *Maschinenbefehlen* und wird im Arbeitsspeicher abgespeichert. Ein Befehl gibt an, welche Operation die ALU mit welchen Operanden ausführen soll, wobei im Befehl nicht die Operanden selber, sondern die Adressen stehen, unter denen sie im Arbeitsspeicher abgespeichert sind. Der Prozessor holt sich die Befehle und die dazu gehörigen Operanden der Reihe nach aus dem Speicher, führt die Befehle aus und gibt die Resultate an den Speicher zurück. Es findet also ein ständiges Kreisen von Bitketten zwischen Speicher und ALU statt (in der Regel über zwischengeschaltete Register). Der Prozessor gemeinsam mit seinem Arbeitsspeicher stellt einen *Ein-Prozessor-Computer* dar. Die künstliche Intelligenz emergiert also aus dem ständigen, stereotypen Kreisen von Bitkettem im Computer. Bei einiger Phantasie kann man an das stereotype Kreisen von Elektronen um die Atomkerne erinnert werden, aus dem die Eigenschaften der chemischen Elemente emergieren. Und wie das Kreisen der Elektronen in den Atomen die Materie zusammen hält, so hält das Kreisen von Bitketten in den Computern der Welt die Informationsgesellschaft zusammen.

Ich nenne jetzt den ersten von zwei erstaunlichen Fakten: *Der beschriebene Computer kann alles berechnen, was auch der Mensch berechnen kann* (der Fachmann sagt, daß er alle *rekursiven* Funktionen berechnen kann). Dazu reichen bereits zwei ALU-Operationen aus, das Addieren einer 1 und das Vergleichen, d. h. das Feststellen, ob zwei Bitketten miteinander identisch sind oder nicht. Außerdem muß es einen sogenannten bedingten Sprungbefehl geben, der angibt, unter welcher Bedingung der Prozessor nicht den im Programm nächstfolgenden Befehl ausführen, sondern zu dem im Sprungbefehl ausgewiesenen Befehl vor- bzw. zurückspringen soll.

Daß unser Computer beliebige zahlenmäßige Rechnungen ausführen kann, leuchtet ein, wenn man sich klar macht, daß sich die vier arithmetischen Grundoperationen letztlich auf das Zählen und Vergleichen zurückführen lassen. Wie aber ist das Rechnen mit Variablen möglich, z. B. das Umformen algebraischer Ausdrücke oder das Lösen von Gleichungen? Um das zu erklären, benötige ich den Begriff des Kalküls. Ein *Kalkül* ist durch eine *Kalkülsprache* und eine Liste von *Tranformationsregeln* festgelegt, nach denen Ausdrücke der Kalkülsprache in andere Ausdrücke überführt werden können. Die Kalkülsprache ist eine *formale* Sprache, d. h. alle Ausdrücke (Sätze) der Sprache sind streng nach vorgegebenen *Syntaxregeln* aufgebaut. Man kann also auch sagen, daß ein Kalkül durch seine Transformations- und Syntaxregeln festgelegt ist. Auch für natürliche Sprachen gelten Syntaxregeln, jedoch nicht streng. Beispielsweise beginnen Aussagesätze »in der Regel« mit dem Subjekt, dem das Prädikat und evtl. ein oder mehrere Objekte folgen. Gegen die Regel darf verstoßen werden, solange der Sinn des Satzes verständlich bleibt.

Jeder kennt den arithmetischen Kalkül. Für arithmetische Ausdrücke gilt z. B. die Syntaxregel: »Das Additionszeichen steht zwischen den Summanden«. Das kleine Einmaleins ist eine Liste von 81 Tranformationsregeln. Andere Kalküle sind z. B. die Algebra, wie man sie in der Schule gelernt hat, die Trigonometrie, die Analysis, der Aussagenkalkül und der Prädikatenkalkül. Programmiersprachen können als Kalkülsprachen aufgefaßt werden. Die Syntaxregeln müssen exakt befolgt werden. Andernfalls kann der Computer eine Eingabe, z. B. einen Befehl oder ein Programm nicht verstehen. Eine Programmiersprache bildet zusammen mit den Regeln, nach denen Ausdrücke der Sprache vom Computer abgearbeitet werden, einen Kalkül. Diese Regeln werden als *interne Semantik* der Programmiersprache bezeichnet. Die interne Semantik einer Eingabe (z. B. eines Befehls oder Programms) sind diejenigen Prozesse, die bei Abarbeitung der Eingabe im Computer ablaufen und die oben als Kreisen von Bitketten beschrieben wurden. Die Sprache, in der ein Maschinenprogramm geschrieben wird, heißt *Maschinensprache*. Maschinensprachen moderner Prozessoren können mehrere Dutzend Befehle enthalten. Die Maschinensprache eines Computers zusammen mit ihrer internen Semantik bezeichne ich *Maschinenkalül*.

Ich nennen jetzt den zweiten, noch erstaunlicheren Fakt: *Mit Hilfe von Maschinenbefehlen, mit anderen Worten aus den Operationen der ALU, lassen sich »im Prinzip« sämtliche Operationen komponieren, die der Mensch ausführen kann, vorausgesetzt, sie sind kalkülisierbar*. »Sämtliche Operationen« sind alle Operationen, zu denen der gesunde Menschenverstand, die *natürliche Intelligenz* fähig ist. »Im Prinzip« heißt: »Soweit das Fassungsvermögen des Speichers ausreicht und genügend Zeit zur Verfügung steht«. Wenn ein Programm existiert, das den Computer befähigt, eine intelligente Operation des Menschen zu *simulieren* (nachzuahmen), ist die Simulation »im Prinzip« möglich. Wenn der Computer dafür aber ein ganzes Jahr benötigt, ist sie *praktisch* unmöglich. »Kalkülisierbar« heißt, daß ein Kalkül gefunden werden kann, in dessen Sprache eine Vorschrift für die Operationsausführung formuliert werden kann. Mit anderen Worten, eine Denkoperation ist kalkülisierbar, wenn sie als Folge von Regelanwendungen auf Ausdrücke einer formalen Sprache dargestellt

werden kann. Es läßt sich nicht beweisen, daß es prinzipiell nicht kalkülisierbare Denkoperationen gibt. Dagegen läßt sich beweisen, daß jeder Kalkül in den Maschinenkalkül unseres Prozessorcomputers transformiert werden kann. Auf diesem Umstand beruhen die Erfolge und die Hoffnungen der KI-Forschung, und aus ihm folgt die Richtigkeit des obigen kursiv gedruckten Satzes. Der Übergang von den Maschinenbefehlen zu den ALU-Operationen ist mit der Transformation des Maschinenkalküls in den Booleschen Kalkül verbunden. Der *Boolesche Kalkül* oder die Boolesche Algebra ist das Endergebnis eines über zwei Jahrtausende langen Entwicklungweges, der mit der Syllogistik des Aristoteles seinen Anfang nahm und der heute zu den Schaltungen geführt hat, aus denen Computer aufgebaut sind. Es ist ein einmaliges Beispiel dafür, wie Philosophie zu Technik geworden ist.

Ich will nun an einigen Beispielen zeigen, wie die Regeln, aus denen sich Denkoperationen komponieren lassen, aussehen können. Auf die Formalisierung der verwendeten Sprache gehe ich nicht ein. Eine geeignete Menge syntaktischer Regeln läßt sich stets finden. Ich beginne mit der stichwortartigen Aufzählung einiger besonders wichtiger Denkoperationen und definiere sie in einer teilweise nicht ganz üblichen Weise. Alle Operationen beinhalten das Finden oder Erfinden von Aussagen über die Welt. Es handelt sich um Leistungen der natürlichen Intelligenz.

Rechnen ist das formale Ableiten im Rahmen eines Kalküls. Mit *Ableiten* ist das bewußte Herleiten neuer Aussagen aus bekannten Aussagen bezeichnet. *Schlußfolgern* ist das Ableiten von Schlüssen aus gegebenen Fakten, das aus introspektiver Sicht des denkenden Menschen in der Regel nicht explizit formalisiert ist.

Auf *Intuition* beruht das Erfinden neuer Aussagen (d. h. neuer Zuordnungen zwischen Objekten und Merkmalen). Auf *Assoziation* beruht das Wiederauffinden bekannter Aussagen (d. h. bekannter Zuordnungen zwischen Objekten und Merkmalen) ohne bewußtes Suchen; Intuition und Assoziation sind Leistungen unbewußter Intelligenz. *Wiedererkennen* ist das Erkennen eines bekannten Objekts oder seiner Klassenzugehörigkeit durch Assoziation.

Die Entwicklung der Intelligenz im Laufe der Evolution ist der Reihenfolge obiger Aufzählung entgegengesetzt. Ihr letztes Produkt ist das Rechnen, also diejenige Leistung, mit der die künstliche Intelligenz begonnen hat. Genauer gesagt hat die künstliche Intelligenz mit dem Rechnen mit Zahlen begonnen. Als Nächstes folgte das Rechnen mit Variablen. Es muß ebenso wie jede intelligente Leistung kalkülisiert werden, d. h. in »Rechnen« im oben definierten Sinne überführt werden, um simuliert werden zu können. Wie sich das Rechnen mit Variablen kalkülisieren läßt, wird jeder erraten können, der einmal mit einer Formelsammlung gearbeitet hat, die nichts anderes ist, als eine Liste von Transformationsregeln. Der Computer muß durch Implementierung eines geeignetes Programms, *Formelmanipulator* genannt, befähigt werden, mit Formelsammlungen zu arbeiten.

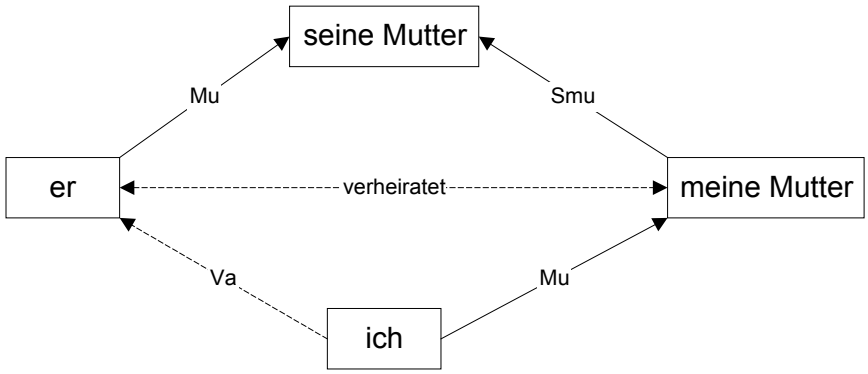

Abbildung 2: Verwandtschaftsgraph

Genauso verfährt man bei der Simulation des Schlußfolgerns. Das soll anhand des folgenden Beispiels demonstriert werden. Eine Person stellt eine andere Person mit den Worten vor: »Dieses Mannes Mutter ist meiner Mutters Schwiegermutter«. Frage: Wer ist die Person? Schnelldenker werden die Antwort vielleicht sofort parat haben. Der Computer gehört zu ihnen. Freilich muß ihm das nötige Wissen über Verwandtschaftsverhältnisse per Programm mitgeteilt werden. In Abbildung 2 sind die verwandtschaftlichen Beziehungen der Aufgabe graphisch dargestellt. Beispielsweise bedeutet der mit Smu beschriftete Pfeil, daß die Person, auf die der Pfeil zeigt, die Schwiegermutter derjenigen Person ist, von welcher der Pfeil ausgeht. Die Beziehungen der durchgezogenen Pfeile sind durch die Aufgabenstellung gegeben. Nach dem gestrichelten

Pfeil vom Vorstellenden (mit »ich« bezeichnet) zum Vorgestellten (mit »er« bezeichnet) ist gefragt. Viele Denksportler, die versuchen, die Aufgabe zu lösen, werden zuerst auf die Beziehung »verheiratet« und danach auf die Beziehung »Va« schließen. (Alle möglichen erschwerenden Umstände bleiben unberücksichtigt; es wird z. B. angenommen, daß »er« keinen Bruder hat und daß »er« und »meine Mutter« in erster Ehe leben.)

Der Computer kann die Antwort ableiten, wenn ihm folgende Regeln bekannt sind:

WENN *x* Schwiegermutter von *y* UND *x* Mutter von *z* ist,
DANN ist *y* mit *z* verheiratet.
WENN *x* Mutter von *y* UND *x* mit *z* verheiratet ist,
DANN ist *z* Vater von *y*.

Die Regeln sind Implikationen. Jede Regel besteht aus Prämisse (Wenn-Satz) und Konklusion (Dann-Satz). In beiden Fällen ist die Prämisse eine Konjunktion zweier Aussagen. Die kursiv gedruckten Variablenbezeichner sind Platzhalter für beliebige Personen und können durch bestimmte Personen substituiert werden. Wenn die Prämisse einer Regel für bestimmte Personen gilt, dann gilt für diese Personen auch die Konklusion.

Der Computer probiert nun, ob die Prämissen erfüllt werden können. Er erkennt sehr schnell, daß die erste Prämisse erfüllt ist, wenn *x* durch »seine Mutter« *y* durch »meine Mutter« und *z* durch »er« substituiert wird. Daraus ergibt sich die Konklusion, daß »er« und »meine Mutter« verheiratet sind. Entsprechend verfährt der Computer mit der zweiten Regel. Die Prämisse ist erfüllt, wenn *x* durch »meine Mutter«, *y* durch »ich« und *z* durch »er« substituiert wird. Es ergibt sich die Konklusion, daß »er« Vater von »ich« ist. Die Lösung der Aufgabe lautet damit: Der Vorgestellte ist der Vater des Vorstellenden. Wenn »er« einen Bruder hat, kann der Vorgestellte auch der Onkel sein.

Nach diesem Vorbild sind ausgeklügelte Systeme des maschinellen Schlußfolgerns, des sogenannten *Inferenzierens*, erarbeitet worden. Sie finden in Expertensystemen Anwendung. Mathematische Grundlage ist der Prädikatenkalkül. Für die Implementierung sind spezielle Sprachen entwickelt worden, die sogenannten *logischen* Programmiersprachen; die bekannteste ist Prolog.

Es folgt ein Beispiel für die Simulation von Intuition, wieder anhand einer Denksportaufgabe. Gegeben sind 9 gitterförmig angeordnete Punkte (Abbildung 3). Alle Punkte sollen durch einen Zug von vier geraden Linien miteinander verbunden werden, ohne dabei abzusetzen. Die Schwierigkeit liegt darin, daß man unwillkürlich mit jeder Geraden drei Punkte erfassen will und nicht auf den Gedanken kommt, das durch die äußeren Punkte umgrenzte Quadrat zu verlassen. Auf diese Weise ist die Lösung jedoch nicht zu finden (Abbildung 3a), sondern erst, wenn man die Grenzen überschreitet und den *Suchraum* erweitert (Abbildung 3b). Der Computer findet die Lösung, wenn man ihm zwei »Regeln« eingibt, die Gleichung einer Geraden durch zwei Punkte und die Formel zur Berechnung des Schnittpunktes zweier Geraden, sowie ein geeignetes Probierprogramm. Der Programmierer des Programms braucht die Lösung der Aufgabe nicht zu kennen.

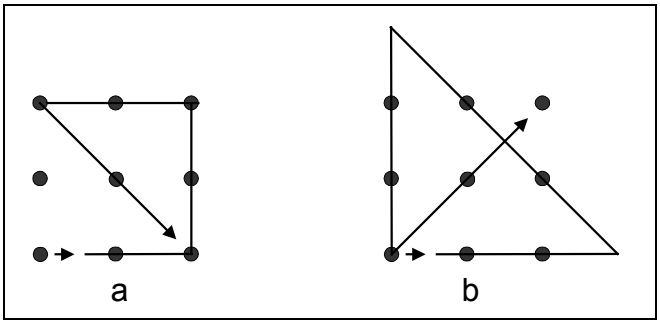

Abbildung 3: Lösungsversuch (a) und Lösung (b) der Denksportaufgabe

Als *intuitiv* werden oft Denkleistungen bezeichnet, die auf der Überwindung von Denkgewohnheiten beruhen. Ein berühmtes Beispiel hierfür ist die Findung (Erfindung) der ringförmigen Strukturformel des Benzols durch August Kekulé. Im Halbschlaf konnte Kekulé sich von der tief verwurzelten Denkgewohnheit befreien, daß Kohlenstoffatome sich zu linearen oder verzweigten Ketten aneinanderfügen können. Kekulé beschreibt dieses Erlebnis folgendermaßen.

»Ich drehte meinen Stuhl zum Feuer und fiel in einen Dämmerschlaf. Wieder tanzten die Atome vor meinen Augen. […] lange Ketten, oft enger miteinander verbunden, waren alle in Bewegung, ineinander verschlungen wanden sie sich wie Schlangen. Aber Achtung, was war das? Eine der Schlangen hatte ihren eigenen Schwanz

gepackt und drehte sich vor meinen Augen spöttisch im Kreis. Blitzartig schreckte ich hoch …«[4] Damit der Computer die Lösung finden kann, reicht es aus, wenn er »weiß« daß zwischen einem H-Atom und einem C-Atom eine Einfachbindung und zwischen zwei C-Atomen Einfach- oder Doppelbindungen möglich sind. Wenn ihm außerdem ein geeignetes »Puzzle«-Programm eingegeben wird, findet er alle existenten und nichtexistenten Kohlenwasserstoffverbindungen, die den genannten Bedingungen genügen. Er findet auch die sogenannten Fullerene; das sind reine Kohlenstoffmoleküle, die erst vor kurzem entdeckt worden sind. Von Denkgewohnheiten braucht der Computer sich nicht zu befreien.

Johannes Kepler löste sich von der Denkgewohnheit, daß die Planetenbahnen Kreise sind. Würde man einen Computer beauftragen, die von Tycho de Brahe gemessenen Orte der einzelnen Planeten jeweils durch eine geschlossene Linie miteinander zu verbinden und die Linie durch eine Kurve nicht zu hoher Ordnung anzunähern, könnte er die Keplerschen Gesetze »entdecken«

Angesichts der genannten Möglichkeiten des Computers stellt sich die Frage, worin der Unterschied zwischen seiner Art zu »denken« und dem Denken des Menschen besteht. Worin liegt der Unterschied zwischen natürlicher und künstlicher Intelligenz, wenn der Computer praktisch alles kann, was der Mensch kann? Sehr deutlich tritt der Unterschied beim Schachspielen zutage. Zweifellos läßt sich Schachspielen simulieren, denn es ist bereits durch die Spielregeln kalkülisiert. Wenn der Computer den Schachweltmeister Kasparow besiegt, liegt das nicht daran, daß Kasparow weniger intelligent ist, sondern an der Rechengeschwindigkeit des Computers, dessen einziger Vorteil darin besteht, daß er mehr Züge vorausspielen kann. In der Bewertung der Spielstellungen ist er erheblich unintelligenter als sein menschlicher Spielpartner. Der Computer schmiedet keine Pläne und entwirft kein Strategien wie der Mensch. Er erfaßt eine Spielstellung nicht »mit einem Blick« wie es der Mensch kann.

Die Unterschiede zwischen menschlichem und maschinellem Denken liegen in erster Linie in der Struktur der Denk- und Speicherprozesse. Der Computer denkt (hardwaremäßig) in Befehlsfolgen; der Mensch kann außerdem (ebenfalls »hardwaremäßig«) in globalen Zusammenhängen denken. Der Mensch weiß hinsichtlich seiner konkreten Lebenssituation mehr als irgendein Computer. Er assoziiert besser und er kann sein Wissen effektiver nutzen als der Computer. Diese Eigenschaften befähigen den Menschen beispielsweise dazu, sich über beliebige Themen mit anderen Menschen »aus dem Stegreif« zu unterhalten oder in den verschiedensten Situationen mit anderen Menschen ohne besondere Vorbereitung zu kooperieren. Ferner hat der Mensch die Fähigkeit zu lernen. Der Wissenserwerb eines Menschen ist ein lebenslanger Prozeß.

Es sei daran erinnert, daß wir bisher nur den Prozessorcomputer betrachtet haben und daß also ihm, dem Prozessorcomputer, die genannten Mängel künstlicher Intelligenz anhaften. Durch einen völlig anderen Hardwareentwurf lassen sich die Mängel teilweise überwinden.

4. Künstliche neuronale Netze

Zwei sehr wichtige Fähigkeiten, die beim Zurechtfinden des Menschen in der Welt eine wesentliche Rolle spielen, nämlich das auf Assoziation beruhende Wiedererkennen und das Lernen, gehen dem Prozessorcomputer trotz intensiver Bemühungen bis heute weitgehend ab, wiewohl die Unterschiede zwischen der natürlichen und der künstlichen Intelligenz infolge der ständigen Zunahme der Rechengeschwindigkeit und der Speicherkapazität heute sicherlich weniger gravierend sind, als sie es noch vor wenigen Jahren waren.

Es gibt aber einen schwerwiegenden Grund, der die Aussichten der KI-Forschung, den »gesunden Menschenverstand« zu simulieren, prinzipiell in Frage zu stellen scheint. Das menschliche Denken und sein Träger, das Gehirn, sind so komplex, daß wir sie nicht durchschauen können. Wie kann man sie dann simulieren? Aber Schwierigkeiten machen erfinderisch. Man kam auf die Idee, nicht das Denken, sondern seinen Träger zu »simulieren« richtiger gesagt, seinen Träger in Form eines künstlichen neuronalen Netzes *real* zu modellieren. Das Netz stellt ein informationelles System dar und kann als solches benutzt werden, ohne daß die Prozesse im Netz durchschaut sein müssen. Daß das möglich ist, zeigt jedes Gespräch zwischen zwei Menschen. Man versteht den anderen, obwohl man die Prozesse in dessen Gehirn nicht kennt. Entscheidend ist,

---

[4] Zitiert nach Sven Ortoli und Nicolas Witkowski: Kekulés Schlange. In: Denkanstöße ‘99. Hrsg. von Heidi Bohnet-von der Thüsen. München, Zürich 1998. S. 183.

daß man die Aussagen des anderen bzw. die Ausgaben des neuronalen Netzes *interpretieren* kann, d. h. daß man etwas Bekanntes, evtl. etwas Erwartetes erkennt.

Ich will versuchen, die entscheidende Eigenschaft künstlicher neuronaler Netze anhand der Schichtenarchitektur von Abbildung 4 plausibel zu machen. Die Kreise der untersten Ebene (Eingabeebene) stellen Rezeptoren, die übrigen stellen künstliche Neuronen dar. Die 7 Rezeptoren seien ein kleiner Ausschnitt aus einem zweidimensionalen Rezeptorfeld, vergleichbar mit der Netzhaut des Auges. Jeder Rezeptor ist als Punkt (Pixel) eines Rasterbildes aufzufassen. Wenn der Punkt hell (der Rezeptor beleuchtet) ist, gibt der Rezeptor den Wert 1 aus, andernfalls den Wert 0. Die Werte werden entlang der Pfeile (Leitungen) nach oben weitergegeben. Jedes Neuron addiert seine Eingabewerte und vergleicht die Summe mit einem bestimmten Wert, dem sogenannten Schwellenwert. Ist die Summe größer als der Schwellenwert, gibt das Neuron eine 1 aus (es »feuert«), andernfalls eine 0 (es feuert nicht).

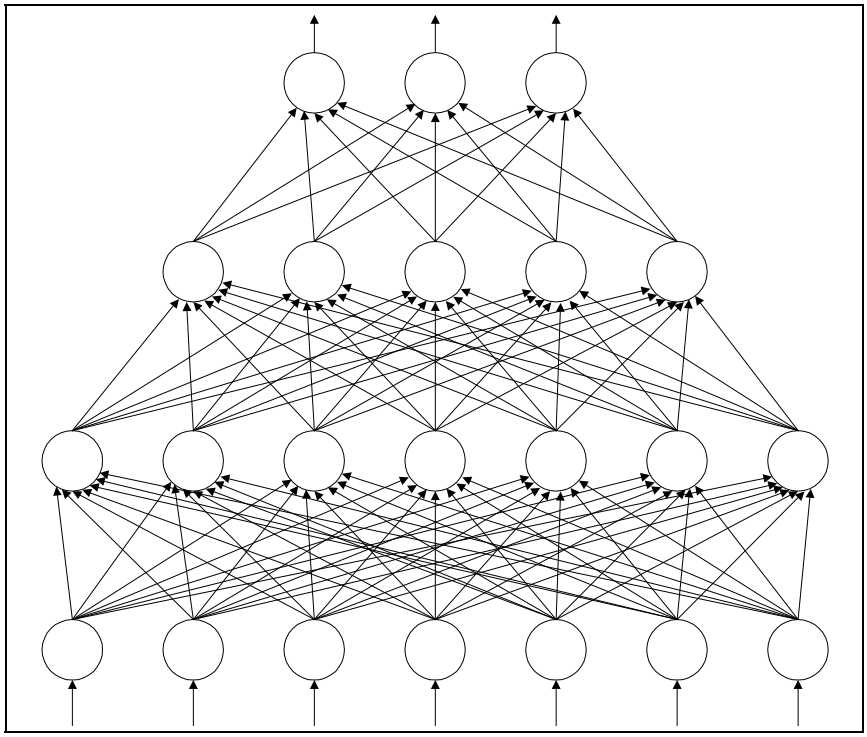

Abbildung 4: Beispiel eines künstlichen neuronalen Netzes (sogenanntes Mehrschichtperzeptron). – Nach Detlef Nauck/Frank Klawonn/Rudolf Kruse: Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme. Braunschweig, Wiesbaden 1996, S. 40.

Wir wollen das Verhalten des neuronalen Netzes etwas genauer untersuchen. Falls die Leitungen die Einsen unverändert weiterleiten, ist das Netz praktisch wertlos, denn es genügt bereits die Belichtung zweier beliebiger Rezeptoren, um alle drei Ausgabeneuronen feuern zu lassen. Das Netz wird erst dadurch nützlich, daß in die Leitungen *künstliche Synapsen* eingebaut werden, welche die weiterzuleitenden Werte verändern (man sagt »wichten«) können. Die künstlichen Synapsen werden auch als *variable Gewichte* bezeichnet. Das Gewicht einer Synapse ist ein reeller Wert, mit dem sie ihren Eingabewert multipliziert. Neuronen empfangen demzufolge reelle Werte und geben binäre Werte aus. Sie zeigen also sprunghaftes oder *nichtlineares* Verhalten. Wenn die Summe der Eingabewerte unmittelbar unterhalb des Schwellenwertes liegt und sich dann minimal aber ausreichend erhöht, so daß sie den Schwellenwert überschreitet, führt der Ausgabewert einen Sprung von 0 auf 1 aus. Aus den Nichtlinearitäten der Neuronen eines Netzes *emergiert* die Fähigkeit zur Selbstorganisation, die hier als Lernfähigkeit in Erscheinung tritt.

Wir betrachten jetzt das mittlere der drei Ausgabeneuronen und führen ein Gedankenexperiment durch. Alle Gewichte werden auf 0 gestellt und auf das Rezeptorfeld wird ein Bild oder Muster, sagen wir ein großes A projiziert. Nun erhöhen wir die Gewichte in beliebiger Reihenfolge in kleinen Schritten. Irgendwann wird das Ausgabeneuron feuern. Es liegt nahe zu sagen, daß das Netz das A *erkannt* hat. Wir wissen allerdings nicht, ob das Ausgabeneuron auch bei anderen Eingabemustern feuert.

Ich nenne jetzt den ersten von zwei Fakten, die ebenso erstaunlich sind wie die beiden früher hinsichtlich des Prozessorrechners genannten Fakten. *Ein neuronales Netz mit einem Ausgabeneuron kann »im Prinzip« lernen, Objekte zweier Klassen nach ihrer Klassenzugehörigkeit zu unterscheiden*. »Im Prinzip« heißt »unbegrenzte Ressourcen vorausgesetzt«, d. h. die Aussage gilt nur, wenn das Netz ausreichend viele Rezeptoren, Neuronen und Ebenen enthält, eine geeignete Lernvorschrift bekannt ist und ausreichend Zeit für den Lernprozeß zur Verfügung steht. Beispielsweise kann ein Netz angelernt werden, den Buchstaben A unter allen möglichen Buchstaben zu erkennen. Auf den Lernprozeß gehe ich nicht ein. Ein Netz mit 6 Ausgabeneuronen kann lernen, alle Buchstaben zu erkennen, wobei die Buchstaben verschieden gedruckt oder auch mit der Hand geschrieben sein dürfen. Ein neuronales Netz kann (immer »im Prinzip«) lernen, Personen am Aussehen oder an der Stimme zu erkennen.

Wir erweitern nun die Ausgabeschicht auf ein zweidimensionales Feld, so daß ein gerastertes Bild ausgegeben wird, vergleichbar mit dem Bild eines Schwarz-Weiß-Fernsehers. Ein solches Netz reagiert auf ein Eingabebild mit einem Ausgabebild. Es *assoziiert* mit einem Bild ein anderes Bild.

Ich nenne jetzt den zweiten erstaunlichen, nach dem Vorangehenden aber kaum noch überraschenden Fakt: *Ein neuronales Netz kann »im Prinzip« jede Assoziation erlernen*. Ein- und Ausgabebilder können Muster, Gemälde, Fotos, Buchstaben, aber auch Texte sein. Ein neuronales Netz kann also auch das kleine Einmaleins lernen, so daß es beispielsweise auf »5 + 7« mit »12« reagiert. Es kann auch eine Formelsammlung »auswendig lernen« Freilich wären derartige Lernaufgaben unzweckmäßig, zum einen weil der erforderliche Aufwand sehr hoch, eventuell sogar zu hoch wäre, zum anderen, weil der Prozessorrechner solche Aufgaben bedeutend effektiver lösen kann.

Nach den Beispielen zu urteilen können neuronale Netze und Prozessorrechner die gleichen intelligenten Leistungen erbringen. Diese Schlußfolgerung ist theoretisch zwar richtig, doch kann der erforderliche Aufwand so unterschiedlich sein, daß das eine der beiden Systeme eine bestimmte Aufgabe praktisch lösen kann, das andere dagegen nicht. Zum Rechnen sind Prozessorrechner prädestiniert, zum Assoziieren und Wiedererkennen dagegen neuronale Netze.

Damit beende ich die skizzenhafte Darstellung der Prozesse, die in Prozessorcomputern und in Neurocomputern (neuronalen Netzen) ablaufen. Ich habe angedeutet, wie sich die verschiedensten Fähigkeiten menschlicher Intelligenz technisch modellieren lassen, so daß sich die Frage stellt, wo die Grenze der Modellierbarkeit, wo die Grenze der künstlichen Intelligenz liegt und ob es überhaupt eine prinzipielle Grenze gibt. Damit komme ich zu der oben formulierten, aber zurückgestellten Frage.

5. Gedanken zum Reduktionismus

Im Zusammenhang mit Abbildung 1 hatte sich folgende Frage gestellt: *Wird irgendwann einmal das sprachliche Modellieren und damit auch Denken und Bewußtsein auf Physik zurückgeführt werden?* Ich werde die Frage nicht beantworten, sondern nur einige Gedanken zu dem Problem und speziell zum sogenannten Reduktionismus äußern. Mit dem Wort *Reduktionismus* wird eine wissenschaftliche Position bezeichnet, welche die Reduktion aller Wissenschaften auf Physik für möglich hält oder sogar fordert. Durch Angriffe aus unterschiedlichen Richtungen ist der Reduktionismus in weiten Kreisen in Verruf geraten und in den Ohren mancher Zeitgenossen zu einem Schimpfwort geworden. Um meine diesbezügliche Position zu verdeutlichen, knüpfe ich an den neuronalen Netzen an.

Die wissenschaftlichen Potenzen der künstlichen neuronalen Netze liegen im Zusammenschluß dieses Bereichs der technischen Informatik mit der Gehirnforschung, mit der Physiologie des Zentralnervensystems (siehe Abbildung 1). Der Zusammenschluß kann den Weg zum gemeinsamen *Fernziel* ebnen helfen, zum Verständnis der Funktionsweise des Gehirns, des materiellen Trägers von Denken und Bewußtsein. Die Informatik würde dadurch zu einer *Naturwissenschaft* werden. Es gibt berechtigte Gründe, eine solche Zielstellung für nicht real oder sogar für gefährlich zu halten.

Das genannte Fernziel verlangt den von Planck geforderten Ansatz, die vollständige kausale Betrachtungweise der Gehirnprozesse und die Reduktion des Denkens auf Physik. Ist die Reduktion denkbar und ist sie erlaubt? Zunächst möchte ich daran erinnern, daß die Chemie den Weg der Reduktion auf Physik bereits durchschritten und daß die Biologie einen Teil des Weges zurückgelegt hat. Ich wage folgende Hypothese: Alle Naturwissenschaften münden in ein einheitliches, exaktes Weltbild. Dieses Weltbild wird

üblicherweise das physikalische genannt, obwohl die Physik eigentlich keine Sonderrolle spielt, höchstens in dem Sinne, daß sie früher als Chemie, Biologie und Informatik die Schaffung eines einheitlichen mathematischen Modells der Welt auf ihre Fahne geschrieben hat.

Wenn Planck die *vollständige* kausale Betrachtungsweise fordert, kann damit nur eine Betrachtung auf der Grundlage des im Augenblick *aktuellen mathematischen* Weltbildes gemeint sein. Das klingt paradox, denn es wird die Reduktion auf Mathematik, d. h. auf eine rein logische, also nicht kausale Wissenschaft gefordert. Das aber ist das Maximalziel, das überhaupt gestellt werden kann, denn eine vollständige kausale Erklärung der Welt ist zwar das Ziel der Wissenschaft, aber es ist ein Ziel, »das grundsätzlich niemals erreicht werden kann. Denn das Ziel ist metaphysischer Art, es liegt hinter jeglicher Erfahrung«. Mathematische Naturbeschreibungen, beispielsweise die Gleichungen der theoretischen Physik, sind im Grunde stets Hypothesen. Wir wissen lediglich, daß sie »mathematisch richtig« sind. Inwieweit ihre Interpretationen *wirklich* gelten, ist unbekannt und was die Interpretationen der in ihnen auftretenden Größen wie Masse, Elektron oder elektrisches Feld *wirklich* sind, ist ebenfalls unbekannt.

Reduktion auf Physik kann also niemals *vollständiges Verstehen* bedeuten, sondern lediglich Zurückführung auf primäre Hypothesen, die sich früher oder später mit Sicherheit als falsch herausstellen werden. Das ist das eine, was man erkannt haben sollte, bevor man gegen den Reduktionismus zu Felde zieht. Das andere ist, daß »Reduktion« nicht etwa heißt, daß kom plizierte Phänomene zu Physik »vereinfacht« werden. Wenn es gelungen ist, chemische Prozesse, d. h. das Bilden und Zerfallen von Molekülen quantenmechanisch zu erklären, so heißt das nicht, daß man aus der Quantenmechanik die Vielfalt der stofflichen Welt *ableiten* kann. Und wenn es gelungen ist, das Entstehen präbiotischen Lebens chemisch zu erklären, so bedeutet das nicht, daß das Phänomen des Lebens aus der Chemie *abgeleitet* werden kann.

Das Entsprechende gilt für die Informatik. Wenn es einmal gelungen sein sollte, Bewußtsein und Denken neurophysiologisch und damit letztlich physikalisch zu erklären, bedeutet das nicht, daß sich beides aus den Grundgleichungen der Physik *herleiten* ließe, schon gar nicht, daß *ich mein* Denken und damit *mein* Handeln »vorausberechnen« kann, daß ich also das Bewußtsein der Willensfreiheit verliere. Das wird nie eintreten.

Das schwerwiegendste Argument der *modernen* Gegner des Reduktionismus – es hat sie immer gegeben – ist die Voraussage, daß durch Reduktion des Denkens auf Physik die Willensfreiheit und das Gewissen und damit die Basis der menschlichen Gesellschaft in Frage gestellt sein werden. Diese Schlußfolgerung ist nicht stichhaltig. Die Reduktion ist erreicht, wenn der Träger des Denkens, das Gehirn vollständig erkannt ist und wenn die Gehirnprozesse, die das Denken *tragen*, vollständig kausal durchschaut sind. Das bedeutet zwar, daß unseren Wahrnehmungen konkrete Prozesse und Zustände im Gehirn entsprechen, die exakt beschreibbar sind, doch ist damit nicht erklärt, was Bewußtsein »wirklich« ist. Das werden wir nie wissen, ebenso wie wir nie wissen werden, was das Elektron »wirklich« ist. Zwischen der Realität und ihrer Widerspiegelung im Bewußtsein tut sich eine unüberbrückbare Kluft auf; es ist die Kluft zwischen Leib und Seele, zwischen Körper und Geist; es ist der kartesische Schnitt, die Grenze zwischen der Popperschen Welt 1 und der Welt 2. Die Reduktion des Denkens auf Physik wird die Kluft nicht schließen.

Ich möchte zum Abschluß des Vortrages noch einmal Max Planck zu Worte kommen lassen:

»Prinzipiell genommen kann jedermann das Kausalgesetz auf alle Vorgänge in seiner Umwelt, der physischen wie der geistigen, nach Maßgabe seiner Intelligenz anwenden, aber nur falls sie durch diese Anwendung nicht beeinflußt werden, also nicht auf die eigenen gegenwärtigen und zukünftigen Gedanken und Willenshandlungen. Diese sind das einzige Objekt, welche sich für ihn begrifflicherweise prinzipiell dem Zugriff des Kausalgesetzes entzieht, freilich gerade dasjenige Objekt, welches seinen kostbarsten und eigensten Besitz ausmacht und von dessen richtiger Verwaltung sein Friede und sein Glück abhängt. Das Kausalgesetz vermag ihm daher auch keine Richtschnur seines Handelns zu gewähren, es kann ihn nicht entbinden von der sittlichen Verantwortung, die ihm durch ein ganz anderes Gesetz auferlegt wird, welches mit dem Kausalgesetz nichts zu tun hat und welches ein jeder in seinem Gewissen mit sich trägt, deutlich genug erkennbar, wenn er es verstehen will.«[5]

---

[5] Max Planck: Positivismus und reale Außenwelt. In: Vom Wesen der Willensfreiheit und andere Vorträge. Frankfurt am Main 1991. S. 138f.