

DIE RÄTSELHAFTE FÄHIGKEIT DES GEHIRNS, SPRACHE OHNE HILFE VON NEURONALEN CODES ZU VERARBEITEN

Ein Paradigmenwechsel führt zum tieferen Verständnis des Denkens

Wolfgang Hilberg

ITG, IEEE, TU Darmstadt

www.hilberg-wolfgang.de

Zusammenfassung. Im Forschungsprojekt „Sprachmaschine“ der TUD wurde entdeckt, dass man in Netzwerken, versehen mit einem Interface, sprachliche Informationen verarbeiten kann, ohne dass Codes dafür notwendig sind. Auf diese Weise lassen sich Worte und sogar Sätze und lange Texte mit einfachen ortsfesten Elementen repräsentieren. Da in solchen Netzwerken eine universelle Informationsverarbeitung möglich ist, lassen sich auch grundsätzlich Schlüsse auf das Netzwerksystem des Gehirns ziehen. Das wird im Folgenden versucht. Das neue Paradigma über das neuronale Denken benötigt eine ausführliche Beschreibung, da es stark von der bisherigen Lehre abweicht. Ein praktisches Modell wurde entworfen, das aus einzelnen eng miteinander verbundenen und deterministisch arbeitenden Funktionsbausteinen besteht: a) Aus einem besonderen Netzwerk in einer Interface-Randschicht. b) Aus einer neuen Methode zur codelosen Repräsentation von Worten durch einzelne vernetzte Neuronen. c) Aus der Abstraktion von Sätzen, die zu repräsentierten *Gedanken* führen. d) Aus einer Methode, die aus einem *Gedanken* mit dem im Netzwerk enthaltenen Sprachwissen verständlichem Text erzeugt. e) Aus der Skizzierung der umfangreichen Forschungsarbeiten, die in Doktorarbeiten mit Simulationen schließlich den experimentellen Nachweis erbrachten, dass das System mit großen Texten erfolgreich arbeitet. Es ist also keine bloße Theorie, sondern ein erprobtes Verfahren für eine echte Denkmaschine nach menschlichem Vorbild.

1 Stand der Wissenschaft.

Wir haben uns so an die technischen Methoden des Schreibens und Druckens von sprachlichen Informationen gewöhnt, sogar an das Speichern in Form von Bit-Symbolen in Computern, dass wir garnicht auf den Gedanken kommen, es könne noch bessere Methoden geben. Und doch existiert eine solche. Denn das Gehirn arbeitet seit Urzeiten damit. Nur haben wir bisher nicht begriffen, wie es das macht.

Die menschliche Sprache hat sich bekanntlich in langen Zeiträumen innerhalb größerer Gemeinschaften entwickelt. In den Gehirnen ist dabei ein äußerst effizientes Informationssystem entstanden, mit dem es möglich war, sich untereinander rasch und gut zu verständigen. Das schließt ein Verstehen der sich ständig ändernden Umwelt ein und die Fähigkeit, sich extrem viele Informationen im Gedächtnis merken zu können. Weil es schon immer so war, scheint sich kein normaler Mensch darüber zu wundern, warum das Gehirn das alles kann. Nur Hirnforscher möchten dies gerne erforschen, siehe die große Menge an jüngeren wissenschaftlichen Aufsätzen, das ausgezeichnete Sammelwerk [1] oder einige populäre Bücher [2,3,4,5,6,7,8]. Sie konnten aber in dem äußerst komplizierten biologischen Gehirnsystem bisher keine typischen sprachlichen Informationen erkennen. Und doch muss der Kopf voller solcher Informationen stecken! Mit den schärfsten Mikroskopen und den neuesten tomographischen Geräten sind sie aber nicht zu entdecken. So benennt die hochdekorierte amerikanische Wissenschaftlerin P. Churchland 2001 [9] das größte Defizit

der Neurobiologie wie folgt „Also wissen wir immer noch nicht, wie das Neuron die Information kodiert“. Und die deutsche Neurowissenschaftlerin A. Friederici [10] stellt in einem Interview 2011 fest „Wie kommt die Sprache in den Kopf? Immer noch fällt es Forschern schwer, dieses uralte Rätsel zu lösen“. Ihr Schluss: „Die Funktion liegt im Netzwerk“.

Es scheint schon ein besonderes Geheimnis zu sein. Wie soll man es sonst verstehen, dass es gleichartige Neuronen ohne Codes für das Hören, Sehen, Fühlen, Riechen, Schmecken gibt, dass es aber – davon nicht unterscheidbar – auch ebensolche Neuronen gibt, welche beliebige und sehr umfangreiche Sprachen verarbeiten können. Tiere dagegen mit vergleichbaren Neuronen verfügen bekanntlich nicht über eine Sprache, also, wie man vielfach daraus folgert, auch nicht über sprachfähige Neuronen. Aus den überall in den Laboratorien untersuchten und inzwischen gut bekannten biologischen Strukturen der Neuronen sind die menschlichen Sprachfähigkeiten jedenfalls nicht zu erklären. (Vergleiche der Netzwerk-Strukturen im sprachlichen und nichtsprachlichen Bereich zeigen, dass Unterschiede existieren, siehe Braitenberg und Schuez [11]. Neueste Untersuchungen zeigen sogar schichtartige Feinstrukturen [43]).

Auch ein Blick auf die Verarbeitung von Sprache mit Hilfe der Computer ist nicht hilfreich. Nach einer Phase großer Begeisterung über die zuerst als „digitale Denkmaschinen“ bezeichneten Computer sind viele Anhänger der sog. „Künstlichen Intelligenz“ inzwischen davon überzeugt, dass Programme und Algorithmen für eine Sprachverarbeitung nicht sonderlich geeignet sind, dass man z.B. in der Vergangenheit die Bedeutung der Grammatik für die Sprachfähigkeit sehr überschätzt hat. Manche meinen, man hätte doch schon früh bedenken sollen, dass alle kleinen Kinder ihre Muttersprache ohne Hilfe eines Grammatik-Lehrbuches gelernt haben. Einer der amerikanischen Pioniere der „Artificial Intelligence“ im Gebiet der Informatik, M. Minsky, sagte 2006 in einem Interview [12], dass die mit großen Hoffnungen angetretene AI jahrzehntelang einen Irrweg gegangen sei in dem Bestreben, den Computer intelligent zu machen. Ausgerechnet er als einer der Begründer dieser Richtung sagte „40 Jahre haben die Leute geglaubt, dass dafür die Grammatik wichtig ist. Interessant, wie eine schlechte Idee den Fortschritt eines ganzen Gebietes lahm legen kann. Man braucht keine Grammatik. Die meisten Menschen sprechen grammatisch nicht korrekt....Wir wissen viel über die grobe Struktur des Gehirns, also etwa, wenn ich diese Region verletze, dann kann die Person auf der linken Seite nichts mehr sehen. Und wir wissen viel auf der untersten Ebene der Synapsen. Aber es gibt keine gute Theorie darüber, was das Gehirn auf der mittleren Ebene tut“. An anderer Stelle noch: „Die Hirnforscher wollen mehrheitlich Gesetzmäßigkeiten verstehen, wie die chemischen Funktionsweisen in Synapsen. Deshalb werden sie lange suchen müssen, um herauszufinden, wie und warum und mit welcher Funktion die spezialisierten Regionen des Gehirns arbeiten...“.

Das Problem für die Ingenieure der Informatik besteht darin, dass die Zahl der für den Computer benötigten Grammatikregeln und aller Ausnahmen riesig groß und nicht zu begrenzen ist. Die Handhabung dieser vielen Regeln ist schwierig und erfordert viel Zeit, so dass sich das Problem selbst mit den zurzeit größten und schnellsten Computern in den notwendigen kurzen Verarbeitungszeiten nicht befriedigend lösen lässt. Vergleicht man mit dem Gehirn, das um viele Größenordnungen langsamer ist, schafft es erstaunlicherweise dennoch eine rasche Sprachverarbeitung.

Eine konkurrierende Technik muss noch erwähnt werden. Sie entstand schon vor Jahrzehnten aus der Vorstellung, dass man nicht den mathematischen Ansatz der Computer verfolgen sollte (bei dem man Zahlen, Worte oder Sätze zuerst durch binäre Codes ausdrückt und diese dann logisch verarbeitet) sondern einen Ansatz, bei dem man sich das menschliche Gehirn mit seinen vernetzten Neuronen zum Vorbild nimmt (McCulloch, Pitts, Rosenblatt, Steinbuch, Hopfield, Kohonen, u.a.). Die Hoffnung war, wenn man sie nur genau nachbaue und sie

richtig zusammenschalte, erhalte man eine intelligente menschliche Struktur. Diese unter dem Namen „Neuronale Netze“ bekannt gewordene Technik, in [13] zusammenfassend dargestellt, blühte kurz auf, hatte aber auf Dauer keinen durchschlagenden Erfolg, weil, wie es hieß, damit offenbar kein „Langzeitgedächtnis“ zu realisieren war [14]. Mit anderen Worten, es zeigte sich, dass man damit keine Sprache verarbeiten konnte. Seither konzentriert man sich in aller Welt auf den mathematischen Ansatz, meist in der Hoffnung, dass man mit den immer größer und schneller werdenden Computern in Zukunft die menschliche Intelligenz übertreffen wird [15].

Schließlich kann auch die Philosophie keine Lösung beisteuern. Beim Streben nach Erkenntnis wird die Fähigkeit des Denkens stets vorausgesetzt, wie dies z.B. R. Descartes [16,17] einst formulierte „cogito ergo sum“. Auch die philosophischen Abhandlungen der Gegenwart bewegen sich traditionell ausschließlich im Sprachraum, argumentieren auf einer höheren geistigen Ebene und setzen dabei nach wie vor die Existenz von Sprache und das Funktionieren des Gehirns voraus, siehe z.B. [18]. Kritisch war zunächst nur S. Kierkegaard „Das reine Denken ist ein Phantom“. Es stellt sich also die Frage, wie „cogito“ physikalisch überhaupt möglich ist. Dabei werden wir dem bekannten Wahlspruch des herausragenden Physikers R. Feynman folgen „Was ich nicht bauen kann, kann ich nicht verstehen“.

Wir haben es mit einem System zu tun, das von einer beliebigen Sprache gestaltet wird und das nur im Zusammenhang mit dieser Sprache funktioniert. Dieses System besteht aus mehr als 100 Milliarden winzigen Gehirnzellen in einem Klumpen aus dichtem feuchtem Flechtwerk. Es bleibt ein Rätsel, wie so etwas zum sprachlichen Denken in der Lage sein kann. Es ist ersichtlich intelligenter als jeder Computer. Die meisten Hirnforscher vermuten deshalb, dass wir es mit einer Informationsverarbeitung zu tun haben, bei der die Prozesse ähnlich wie in Höchstleistungsrechnern massiv parallel verlaufen. Bestätigen lässt sich das nicht, denn man kann es leider nicht messen. Man weiß noch nicht einmal, siehe die obigen Zitate, in welcher Form Informationen im Gehirn existieren. So schien nur die Untersuchung der Signale zwischen den Neuronen übrig zu bleiben, die sich wenigstens messen lassen. Aber es ist zweifelhaft, ob sie allein für das umfangreiche Sprachwissen unter Einschluss des Gedächtnisses verantwortlich gemacht werden können.

Bei der Lösung des Problems wie denkt das Gehirn ist man also noch nicht sehr weit gekommen. Man ist heute schon froh, wenn man bei speziellen Anregungen zusammenhängende aktive Gehirnregionen im Bild erkennen und Zuordnungen entdecken kann. Der vorliegende Aufsatz soll diesen Aspekt nicht behandeln, sondern darüber hinausgehend zeigen, dass vor allem die sprachliche Informationsverarbeitung auf einzelne zusammenarbeitende neuronale Gehirnzellen (Neuronen) angewiesen ist.

2 Grundzüge des neuen Ansatzes.

Grundzüge des neuen Ansatzes. Im Folgenden wird vorgeschlagen, einen Paradigmenwechsel vorzunehmen. Zunächst sollten wir die Idee einer massiven Parallelverarbeitung fallen lassen und von einer im wesentlichen sequentiellen Informationsverarbeitung ausgehen. Das lässt sich wie folgt begründen: Wenn wir sprechen oder schreiben, folgt ein Wort auf das andere. Auch Sätze folgen passend aufeinander und führen schließlich zu einer meist sinnvollen Kette von Gedanken. Damit lässt sich das Denken als ein einziger fortschreitender Prozess definieren. Wichtig ist für das folgende noch die Vorstellung, dass sich Teile des Denkprozesses in verschiedenen aufeinander folgenden Abstraktionsebenen abspielen, eine Vorstellung, die aus der Sprachwissenschaft übernommen wurde. Abstraktionsebenen stehen in enger Verbindung miteinander. Sie tauschen Signale miteinander aus. Die sequentiellen Prozesse in den Abstraktionsebenen können dabei gleichzeitig ablaufen.

Das vorgeschlagene neue System ist als neurobiologisches System nur funktionsfähig, wenn es ohne Codes arbeitet (natürlich kann es technisch nur mit Hilfe von Codes simuliert werden). Im folgenden lässt sich zeigen, dass dieses theoretische Problem des codelosen Gehirns völlig im Rahmen der Informationstheorie gelöst werden kann.

Mit dem neuen System, dessen Funktion durch Simulationen überprüft wurde, lässt sich die Vermutung erhärten, dass es auch in der Natur keinen Neuronencode gibt. Die Forderung nach Neuronen ohne Informationscodes ist daher wesentlicher Bestandteil des neuen Paradigmas. Nur diese Eigenschaft befähigt den Menschen, jede beliebige Sprache lernen zu können.

Durch die vorgeschlagene Funktionsweise wird das mühsame Erlernen von Grammatikregeln völlig überflüssig. Denn durch das exemplarische Lernen von Text bilden sich in allen Abstraktionsebenen Netzwerkstrukturen, die in ihrer Gesamtheit eine implizite Grammatik darstellen, die auch sofort und sehr einfach einsetzbar ist.

Von der Technik her gesehen, kann man das neue sprachfähige System auch als eine Weiterentwicklung des anfangs erwähnten klassischen Konzeptes der „Neuronalen Netze“ betrachten, bei dem eine Sprachfähigkeit leider nicht zu erreichen war. Um hier weiterzukommen, wird ein anderes Gehirnmodell entworfen, das ohne die möglichst genauen Nachbildungen natürlicher Neuronen auskommt und es werden grundsätzliche Vorstellungen darüber entwickelt, wie dieses Netzwerkmodell sprachliche Informationen verarbeiten kann. Dabei werden nur ganz elementare Operationen wie die Aktivierung von Neuronen oder die Übertragung von Neuronenzuständen zugelassen. Alle Programme wie beim Computer werden sorgfältig vermieden. (Vermutlich wird die Natur auch immer die simpelsten Möglichkeiten bevorzugen).

Dem Modell werden besondere Netzwerkstrukturen zugrunde gelegt, welche schon 2002 und 2004 beschrieben wurden [19,20]. Ihr Vorteil besteht darin, dass sie keine mathematischen Erfindungen sind wie die zeilenorientierten Netzwerkstrukturen in den oben erwähnten klassischen Neuronalen Netzen. Sie sind vielmehr der Natur abgeschaut, denn sie werden aus Messungen sprachlich zulässiger Wortfolgen gewonnen. Man kann daraus schließen, dass diese primär und dauerhaft im Gehirn gespeichert sind, da sie bei allen Menschen einer Sprachfamilie unbewusst und augenblicklich verfügbar sind. Im Modell wird dieses Netzwerk zudem die Funktion eines Interface zwischen Außenwelt und Innenwelt übernehmen. Damit lässt sich ein Denk-Mechanismus schaffen, der völlig mit einer symbolfreien Repräsentation von Worten und darüber hinaus mit gleichermaßen repräsentierten größeren sprachlichen Informationsbausteinen arbeitet, die Gedanken genannt werden sollen. Sofern die Natur in ähnlicher Weise arbeitet – das ist nach wie vor eine Hypothese - erreicht sie einen Vorteil, der mit der bekannten Technik in Computern nicht zu realisieren ist. Denn selbst einzelne im Netzwerk eingebaute Neuronen können, als verabredetes Zeichen wirkend, große Informationsmengen repräsentieren, sie bei Bedarf als verstehbaren Text ausgeben, sich mit anderen Neuronen verknüpfen und rasch und problemlos Gedankenketten bilden. Betrachten wir nun die einzelnen Aspekte des neuen neuronalen Denkmodells etwas näher:

3 Die Sprache als Grundlage.

Beginnen wir mit der alten Weisheit der Philosophen und Sprachforscher, die sich auch hier wieder bestätigt: „Denken ist nur durch Sprache möglich“. Vielleicht könnte man im technischen Zeitalter noch spezieller formulieren „Denken ist das Hantieren mit sprachlichen Informationen“. Wenn wir aber daran denken, dass diese Tätigkeit im Gehirn vor sich gehen muss, führt das sofort auf ein großes Problem. Denn die Informationstheorie lehrt uns [21], dass die Information (auf deutsch ursprünglich „Nachricht“ [22]) immer an vereinbarte Symbole gebunden ist (Buchstaben, Zahlen, Worte, Codes, Laute, Zeichen, usw.). Das ist die

Basis der Informationswissenschaft. Im Gehirn, dem leistungsfähigsten informationsverarbeitenden System der Welt gibt es aber überhaupt keine Symbole. Man findet lediglich eine ungeheuer große Anzahl von winzigen nahezu unterschiedslosen Gehirnzellen, den Neuronen, die in einem sehr komplexen Netzwerk miteinander verbunden sind. Jahrzehntlang haben Hirnforscher, wie schon erwähnt, vergeblich nach einem Neuronencode gesucht. Man meinte, ein solcher Code sei, wie man das vom Computer her kennt, für eine Informationsverarbeitung denknotwendig. Das eingangs schon erwähnte Zitat der Neurobiologin P. Churchland lautet in der Fortsetzung „Zudem wissen wir noch nicht mit befriedigender Exaktheit, was wir mit Information meinen. Es fehlt an einem ausgereiften Begriff von Information, der für die Neurowissenschaft anwendbar ist“. Erst in jüngster Zeit kam man hier weiter [23,24].

Man kann nämlich zeigen, dass man keinen neuen Informationsbegriff suchen muss, sondern durchaus von den bekannten Definitionen der Informationstheorie ausgehen kann. Dabei ist es zweckmäßig, zu unterscheiden, ob es um eine Nachricht geht, die sich an das Verständnis des Menschen richtet (z.B. Worte, einerlei wie sie geschrieben oder gesprochen werden), oder um eine Nachricht, die nur innerhalb des Körpers wirkt und kein Verständnis des Menschen benötigt (wie z.B. DNA-Molekülcodes). Nur die erste Art von Information wird hier diskutiert. Die Suche nach einem neuen Informationsbegriff wird dadurch überflüssig, dass man eine besondere Art der Speicherung und des Transfers von Information einführt. Sie ergibt sich aus der Erkenntnis, dass Neuronen auch ohne Code eine sprachliche Information im Zusammenhang mit dem Netzwerk repräsentieren und verarbeiten können (siehe wieder in [24]). Das heißt, sie stehen dann nur stellvertretend für eine ganz normale Information (z.B. ein Wort), die als solche grundsätzlich von außerhalb des Gehirns kommt, die aber im Innern unsichtbar wird. Dieser Auffassung folgend ist das Gehirn also ein System von unzähligen vernetzten Neuronen, die ziemlich unabhängig von ihrer biologischen Struktur jeweils einzeln eine konkrete Information repräsentieren. Sie sind in einem Nerven-Netzwerk miteinander verbunden, können Signale austauschen und miteinander kooperieren. (Die Form und Beschaffenheit der Signale, der sog. Spikes, wird hier nicht diskutiert, da diese Impulse, über alle Neuronen gesehen, nicht sehr unterschiedlich sind und nur eine geringe Information enthalten können).

Um Missverständnisse zu vermeiden, sei noch folgendes bemerkt. Auf eine codelose Repräsentation von Neuronen für emotionale und sensorische Ereignisse und ihren deutlichen Einfluss auf das Denken hat schon A. Damasio hingewiesen. Sein Buchtitel „Descartes' Error“ macht deutlich, dass dieser Einfluss damals von Descartes noch nicht erkannt worden war. Da die Verbindung vom nichtsprachlichen zum sprachlichen Bereich ein eigenes Thema ist, wird es im folgenden nicht betrachtet.

Zum Verständnis des vorliegenden Aufsatzes sind neurobiologische Fachkenntnisse nicht erforderlich. Lediglich eine klare Vorstellung von dem in Technik und Wissenschaft geltenden Informationsbegriff (dargestellt mit Symbolen) sollte vorhanden sein.

4 Der entscheidende Übergang von der Außenwelt zur Innenwelt.

Die von einem Wort gelieferte Information und die Bedeutung eines Wortes sind im Wesentlichen identisch. Denn theoretisch müssen wir die Worte unserer Sprache als Symbole begreifen, die verabredungsgemäß auf bestimmte Objekte hinweisen, d.h. auf sie deuten, entweder auf solche aus der Umwelt oder auf andere Worte oder erklärende Sätze. (Wenn wir z.B. „Rose“ oder „Wahrheit“ sagen, sprechen wir genau die bekannten Objekte an). Linguistische Diskussionen über die Bedeutung von Worten spielen sich vollkommen im Bereich der Sprache ab. Wir verzichten auf diesen Aspekt und betrachten für die Klärung der Gehirnmechanismen die Worte als gegeben. Man überlegt sich leicht, dass jedes Wort als

Sprachelement im Innern des Gehirns einen Repräsentanten haben muss (am einfachsten ein Neuron). Sonst könnten wir uns garnicht an all die Worte erinnern, die wir einmal gelernt haben. Weil Neuronen einen festen Platz im neuronalen Netzwerk haben, können sie dort Worte auch ohne Benutzung von Symbolen auf Dauer repräsentieren. Das kann wie folgt charakterisiert werden: „statt Code ein fester Platz“. Wie schon erwähnt, muss die ursprüngliche Information von außen kommen. Das ist aufgrund folgender Hypothese möglich. Zwischen dem Außenraum und dem Gehirn muss es, technisch ausgedrückt, eine Schnittstelle bzw. ein Interface-Netzwerk geben. Die dort befindlichen Neuronen – und nur diese – haben direkte Verbindungen zu Organen, die zum Senden (Sprechen, Schreiben) und zum Empfangen (Hören, Lesen) von Worten benötigt werden. Wird ein Wort empfangen, wird das Neuron, das genau dieses Wort im Interface repräsentiert, durch koinzidierende Signale ausgewählt und aktiviert. (Der Techniker sieht hier Übereinstimmungen mit den Auswahlmethoden in assoziativen Speichern [44]). Will man ein Wort senden, wird das repräsentierende Neuron aus dem Inneren des Gehirns heraus aktiviert.

5 Die messbare Netzwerkstruktur des Übergangs.

Das Interface besteht aus einem Netzwerk mit einer besonderen Struktur. Sie lässt sich auf indirekte Weise ermitteln, indem man mit Hilfe großer Textsammlungen notiert, welche Worte in einem laufenden Text direkt aufeinander folgen können. Die Begründung für die Messung ergibt sich aus der Überlegung, dass in einem Netzwerk bei nacheinander aufzurufenden Wort-Neuronen schnelle Reaktionen nur bei ununterbrochenen Leitungen zwischen ihnen möglich sind. Beim Sprechen findet man sie dann ohne langes Nachdenken.

Die graphische Darstellung des Netzwerkes bereitet wegen der Vielzahl von Worten und der noch größeren Zahl von sich überkreuzenden Verbindungen Schwierigkeiten. Aber selbst bei hunderttausenden von Worten eines Wortschatzes lässt es sich in einer Verbindungsmatrix übersichtlich darstellen. Es zeigt sich ein allgemeines Gesetz für die optimale Kommunikation (maximale Entropie), siehe das in [19,20] beschriebene Ergebnis. Es gibt sich durch eine nahezu konstante Punktdichte in der Matrix mit logarithmischen Achsenteilungen zu erkennen. (H.-D. Burschel hat die genaueren Verteilungen gemessen [30]. Sie sind sprachtypisch, ihre Diskussion ist hier aber entbehrlich). Dieses natürliche Netzwerk hat man einmal in seiner Jugend im Gespräch mit anderen Menschen im Kopf aufgebaut und man vergisst es sein Leben lang nicht. Es ist bei allen Mitgliedern einer Sprachfamilie gleich, denn es ist allen Mitgliedern genau bekannt, welche Worte direkt aufeinander folgen können. Das neuronale Interface-Netzwerk muss also in allen Köpfen dieselbe Struktur haben wie das außen gemessene sprachliche Netzwerk. (Durch Simulationen konnte ermittelt werden, dass solche für die Kommunikation optimalen Netzwerke auch in allen höheren Ebenen eines neuronalen Sprachsystems zu finden sind. Es genügt für das folgende, einfach ihre Existenz zu akzeptieren, denn sie werden praktisch ohne besonderes Nachdenken genauso wie das Netzwerk in der Basisebene durch exemplarisches Lernen von Texten aufgebaut, so wie Kinder eine Sprache durch einfaches Hören und Sprechen lernen).

Ein Text kann nicht nur empfangen werden und im Interface-Netzwerk eine Folge von Worten aktivieren, sondern das Gehirn kann natürlich auch selbst einen Text generieren. Um z.B. einen Satz zu erzeugen, werden die repräsentierenden Neuronen im Interface eines nach dem anderen aktiviert, so dass dort als Spur ein Textpfad entsteht (das wird im folgenden noch ausführlicher diskutiert). Man kann sich vorstellen, dass diese Spur nach kurzer Zeit auch wieder vergehen kann, womit sie vergessen wird.

6 Die Worte als „Drucklettern“.

Die prinzipielle Arbeitsweise der Wort-Neuronen im Internet kann man vergleichen mit Gutenbergs Erfindung, nämlich der Benutzung von bleiernen Lettern beim Buchdruck. Trotz ihrer begrenzten Zahl genügen diese bekanntlich für das Drucken beliebig langer Texte. Noch anschaulicher ist heute für uns wohl der Vergleich mit den Tasten eines Keyboards beim Computer. Hier hat man für jeden Buchstaben nur eine Taste. Geben wir jedoch in das Interface einen Text ein, in dem ein Wort mehrfach vorkommt, wird immer wieder dasselbe Neuron aktiviert. Der Unterschied zum Keyboard ist nur ein quantitativer, denn im körpereigenen Interface-Netzwerk können hunderttausende verschiedener Wort-Tasten aktiviert werden. Wegen der Winzigkeit der Neuronen benötigt das insgesamt nur wenig Raum.

7 Was ist ein Gedanke?

Wenn wir im Interface einen Satz aufrufen wollen, benötigen wir Steuersignale aus dem Innern des Gehirns. Sie kommen von Neuronen, die eine konzentrierte Information repräsentieren, die wir einen Gedanken nennen wollen. Diese Bezeichnung, die umgangssprachlich etwas Unfassbares bezeichnet, geht hier aber auf eine kurze und klare Definition des Sprachphilosophen Ludwig Wittgenstein [25,26] zurück, die lautet, dass ein Gedanke der wesentliche Inhalt eines Satzes ist. Frühere grundlegende Überlegungen stammen auch von Gottlob Frege [27]. Nach ihm ist ein Gedanke ein „objektiver Inhalt“ und ist nicht als „bloße Vorstellung“ aufzufassen. Er sagt: Alle, die einen Satz verstehen, erfassen denselben Inhalt. Wir übernehmen diese Definitionen und bilden zuerst aus einem gegebenen Satz die Repräsentation des wesentlichen Inhalts. Für diese Rolle genügt sogar die Repräsentation durch ein einziges Neuron, das im Zusammenhang mit dem umgebenden Netzwerk gesehen werden muss. Hat das Neuron diese Aufgabe übernommen, kann es umgekehrt als Quelle für einen zu generierenden Satz dienen. Sichtbar ist zunächst nur, dass der Gedanke aus der Repräsentation eines wichtigen Wortes besteht, das nur ein Zeichen ist, das auf die damit verbundene umfangreichere Satz-Information deutet. Dieses wichtige Wort musste bei der Gedankenbildung zuerst einmal aus den im Satz enthaltenen Worten geringerer Bedeutung und ihren Verknüpfungen hervorgehoben werden.

Der geschilderte konkrete Prozess ist unterschiedlich zu früheren qualitativen Vorstellungen über das Denken. So gab es in der Vergangenheit schon manchmal tiefeschürfende Überlegungen bedeutender Wissenschaftler, dem Geheimnis des Denkens etwas näher zu kommen. Von Albert Einstein (zitiert in [16]) kann man z.B. folgendes lesen: „Worte oder Sprache, wie sie geschrieben oder gesprochen werden, spielen in meinem Denkmechanismus anscheinend überhaupt keine Rolle.Die Elemente des Denkens sind mehr oder weniger deutliche Vorstellungsbilder“.

Jahrzehnte später hat Antonio Damasio (wiederum in [16]), etwas genauer geschrieben: „Ich bin also der Ansicht, dass ein Organismus dann Geist besitzt, wenn er neuronale Repräsentationen bildet, die zu Vorstellungsbildern werden, sich in einem Prozess, den wir Denken nennen, manipulieren lassen und schließlich das Verhalten beeinflussen“.

Warum sprechen beide Wissenschaftler so gerne von Vorstellungsbildern? Offenbar, weil in ihnen der Zusammenhang vieler Einzelheiten (Bildpunkte, Segmente, Einzelobjekte) mit einem Blick deutlich wird. Vergleicht man mit dem obigen Vorschlag der Zusammenfassung vieler Worte eines Satzes oder eines größeren Textes in einem Gedanken, ist ja Ähnliches vorhanden. Das heißt, der wesentliche Inhalt der Kombination vieler Sprachelemente (Satz aus Buchstaben und Worten) wird ganz unmittelbar und kompakt im Gedanken für den Menschen erfassbar. In diesem Sinn wird – um Irritationen zu vermeiden – hier auf den Begriff „Bild“ verzichtet und gleich sprachlich präzisiert, was sinnvoll erscheint. Damasio

spricht übrigens ausdrücklich vom Geist, der neuronale Repräsentationen bildet, die zu Bildern werden. Wenn er sagt, dass erst die Manipulation der Bilder zum Denken führt, wird die Analogie eines Gedankens mit einem Bild besonders deutlich.

8 Der Gedanke entsteht aus einem Satz.

Es ist wohlbekannt, dass Neuronen mit vielen Nervenleitungen miteinander verbunden sind, über die sie interagieren können. Das ist, biologisch gesehen, ein komplizierter Vorgang. Zur Ausbreitung und Verknüpfung von Informationen werden jedoch nur folgende elementare Eigenschaften benötigt. Sendet ein Neuron ein Signal an ein anderes Neuron, kann man wie folgt unterscheiden: Repräsentiert der neuronale Empfänger schon eine Information, dieselbe oder eine andere, wird er lediglich aktiviert. Ist er dagegen noch nicht belegt und noch nicht vernetzt, kann er die repräsentierte Information des Senders einfach übernehmen (in den vorgenommenen Simulationen, die nur mit Code-Symbolen möglich sind, bestand das im Prinzip aus dem Weiterreichen einer beliebigen Zahl, die man einmal für das ursprüngliche Wort gewählt hatte). Jedes Neuron entscheidet zudem mit einer Schwelle, bei wie vielen Eingangssignalen es aktiviert wird. (Eingänge mit hemmender Wirkung wie beim Modell von McCulloch-Pitts werden zunächst nicht betrachtet. Wir bleiben bei der Betrachtung der einfachen Grundfunktionen).

Angesichts der weltweiten Untersuchungen der biologischen Struktur der Neuronen muss noch folgendes klargestellt werden: Die ausgiebig diskutierte Synapsen befinden sich an den Übergängen der Neuronen zu den Verbindungsleitungen. Sie bestimmen die ausgesandten Signale und ihre Eigenschaften. Auch die Darmstädter Forschungsgruppe war an der Technik solcher Untersuchungen beteiligt [42]. Synapsen haben mit der eigentlichen sprachlichen Information nichts zu tun. Man kann sie als Kontakte für den Signalaustausch betrachten, die insbesondere bei kindlichen Lernprozessen neu geschaffen oder in ihrer Stärke verändert werden. Das gehört aber nicht mehr zum Thema des vorliegenden Aufsatzes.

Wie kann man sich nun die Organisation des im Gehirn zu bildenden Gedankens vorstellen? Ein Blick in die Historie der Sprachwissenschaft ist dabei hilfreich. Der berühmte amerikanische Linguist B.L. Whorf [28] hatte einst die Vorstellung von Abstraktionsebenen eingeführt: „Die Erkenntnisse der Sprachwissenschaft machen die Anerkennung von Abstraktionsebenen nötig, von denen jede durch eine besondere Struktur gekennzeichnet ist“. Diese Idee kann man in das Gebiet der neuronalen Denkprozesse wie folgt übertragen:

Ein vom Menschen empfangener Satz, der in der Interface-Schicht aus einer Anzahl von aufeinander folgenden, mehr oder weniger wichtigen (bzw. häufigen) Wortneuronen besteht, wird in einem über dem Interface befindlichen hierarchischen Netzwerksystem aus mehreren Abstraktionsebenen weiter verarbeitet. Wieder sind nur ganz elementare Operationen zugelassen. Schon in der Basisebene wird der Satz verkürzt, indem die häufigsten und damit informationstheoretisch unwichtigsten Worte entfernt werden (das sind, wie in der Verbindungsmatrix zu erkennen, die dort am Anfang plazierte Neuronen mit den meisten Verbindungen zu anderen Neuronen (siehe wiederum in [19]). Die verbleibenden Worte werden im Netzwerk der folgenden Ebene zu einem neuen komplexen Satzgebilde zusammengefasst. Es entsteht ein Metasatz aus Metaworten in einem Metatextpfad. In ihm sind sämtliche grammatische Möglichkeiten der Aufeinanderfolge von Wortpaaren enthalten.

Betrachten wir zur Veranschaulichung einige der ersten Operationen. Im ersten Schritt entsteht aus zwei oder auch drei aufeinander folgenden Worten ein einziges Metawort. Es wird ins erste Meta-Netzwerk eingesetzt, das in seiner Gesamtheit die Repräsentationen aller kleinen Wortgruppen mit ihren möglichen Wort-Aufeinanderfolgen enthält. (Dass diese auch wirklich durch die Metaworte repräsentiert werden, ergibt sich daraus, dass Metaworte mit Hilfe des Netzwerks auch wieder die zugehörigen ursprünglichen Wortgruppen erzeugen

können). Im zweiten Schritt entsteht aus zwei oder drei aufeinander folgenden Metaworten wiederum ein einziges repräsentierendes Metawort, diesmal in der zweiten Metaebene. Dort findet man auch die Repräsentationen aller vorher aufgerufenen Gruppen von Worten und Metaworten (vier/sechs Worte und zwei/drei Metaworte). Das setzt sich in den nachfolgenden Ebenen so fort. Nach einigen Schritten durch mehrere Ebenen ist schließlich ein ganzer Satz oder sogar ein größerer Text durch ein einziges Neuron inmitten seiner Netzwerkumgebung repräsentiert. Weil es wichtig ist, sei es nochmals betont: Dieses Neuron kann man zunächst als Repräsentanten des wichtigsten Wortes betrachten, aber es ist zugleich auch der Repräsentant eines damit assoziierten ganzen Satzes (vergleichsweise ist ein Präsident sowohl eine Person als auch der Repräsentant eines Volkes).

Im Hinblick auf das schrittweise Ausscheiden der jeweils unwichtigeren Worte kann man das als einen elementaren Abstraktionsprozess begreifen, der mehrere Abstraktionsebenen durchläuft (dem ursprünglichen lateinischen Wortsinn *abstrahere* = wegnehmen folgend). Der Gedanke ist also das Ergebnis einer sehr einfachen Abstraktion, welche mit Hilfe des Netzwerkes auch die Qualität des ursprünglichen Satzes verändert hat, da jede Abstraktion, wie Beispiele lehren, eine Verallgemeinerung und eine Informationsverdichtung mit sich bringt. Man beachte, dass eine bloße Verdichtung von Informationen wie in bekannten Computerverfahren nur das Ziel hat, einen Text zu komprimieren, d.h. mit möglichst wenigen Bits zu codieren und danach bei Bedarf wieder möglichst unverändert zurück zu gewinnen. Abstraktionen sind aber die Vorbedingung für eine freiere Gestaltung der Gedanken und dem daraus folgenden freieren Denkvorgang.

Der Gedanke enthüllt seinen Inhalt dadurch, dass die Abstraktion wieder rückgängig gemacht wird, so dass wir ihn als einen Satz mit entsprechendem Inhalt wieder gewinnen, hören oder lesen können. Die Aufrechterhaltung der grammatischen Struktur des Satzes ist dabei nicht zwingend, sondern nach Wittgenstein nur die Bewahrung des wesentlichen Inhalts.

9 Die Erzeugung eines Satzes aus einem Gedanken.

Wir wollen jetzt die notwendigen Hilfsnetzwerke für die Texterzeugung betrachten. Geht man von einem Gedanken für einen repräsentierten Satz aus, so erfolgt die Generierung des Satzes, indem der an der Spitze stehende Gedanke, schrittweise im System nach unten gehend, durch die in den Metaebenen enthaltenen Teilgedanken ergänzt wird. Jedes dieser Meta-Netzwerke ist, wie schon gesagt, so strukturiert, dass es die möglichen direkten Aufeinanderfolgen aller Teilgedanken enthält (d.h. es ist nach demselben Prinzip gebaut wie das Netzwerk für die Aufeinanderfolge der Worte in der Basisebene). Den bei jedem Schritt passendsten Teilgedanken für die Ergänzung des noch unvollständigen Meta-Textpfades findet man mit Hilfe zusätzlicher Netzwerke, die jeder Abstraktionsebene zugeordnet sind. Sie sind dort zunächst wieder nur Speicher für alle möglichen Metaworte (Teilgedanken) und ihrer möglichen Aufeinanderfolge. Aber sie haben noch die besondere Eigenschaft, sich einige der im aktuellen Textfluss gerade erzeugten Metaworte durch eine kurzzeitige Aktivität merken zu können. Von jeder Position des so markierten Meta-Textpfades wird eine Vorhersage (Prädiktion) auf mögliche Metaworte der zu wählenden Ergänzung gemacht. Mit Hilfe der Prädiktionsnetzwerke lässt sich nun (z.B. in der Simulation durch Konjunktionen oder Mehrheitsentscheidungen) recht einfach ermitteln, welche Metaworte als Fortsetzung des begonnenen Textes überhaupt in Frage kommen (die Natur wird das Problem vermutlich ohne zusätzliche Netzwerke und eleganter als die Technik lösen). In der Regel bleibt dabei eine überschaubare Anzahl von zulässigen Metaworten übrig, aus der die passendste Textergänzung ausgewählt wird. Das kann technisch recht unterschiedlich gestaltet werden. Wenn man z.B. nur die Metaworte zulässt, die bei der Abstraktion weggenommen worden waren, führt das zu einer wortwörtlichen Rekonstruktion.

Viel interessanter ist es aber, wenn man bei der Wahl der Textergänzung nicht nur die vom früheren Abstraktionsvorgang her bekannten Metaworte benutzt, sondern auch andere im Text-Zusammenhang mögliche Teilgedanken wählt. (Es können in einem Schritt auch mehrere aufeinander folgende Metaworte ausgewählt werden oder auch einige entfallen).

Die Leistungsfähigkeit der Prädiktionsnetzwerke ergibt sich daraus, wie viele Metaworte bzw. Teilgedanken und ihre mögliche Abfolgen aus umfangreichen Textsammlungen entnommen und dann in ihnen gespeichert wurden. Sie stellen in ihrer Gesamtheit ein exemplarisch gelerntes allgemeines Sprachwissen dar. Die große Menge der möglichen Metaworte, bzw. ihrer neuronalen Stellvertreter, benötigt natürlich auch den entsprechenden Raum.

Damit ist es möglich, aus einem repräsentierten Gedanken aus dem Zusammenhang heraus viele inhaltlich gleiche oder – durch die Wahlfreiheit bei den Ergänzungen bedingt - ähnliche Sätze zu generieren. Das macht übrigens die Bezeichnung Gedanke für eine komplexe Verdichtung wesentlicher Informationen wiederum recht sinnvoll, denn unsere naive Auffassung von einem Gedanken beinhaltet, dass wir einen solchen durch viele verschiedene Sätze zum Ausdruck bringen können.

Die Eigenheiten der vorgeschlagenen Satzgenerierung mit Hilfe von Prädiktionen hat Jochen Meyer im Projekt Sprachmaschine einmal mit folgendem überraschenden Experiment deutlich gemacht. Er verteilte zunächst seinen - wie er sagte – neuen Institutsbericht an alle Projektteilnehmer. Nichts Böses ahnend machten wir uns ans Lesen. Es war ein flüssiger deutscher Text mit verständlichen Worten und gut lesbaren Wortfolgen. Aber schon nach dem Lesen der ersten Seite war man verwirrt. Man konnte beim besten Willen in diesem Text keinen Sinn entdecken. Danach verriet er uns lachend des Rätsels Lösung. Er hatte bei der Generierung der Sätze die Prädiktionsnetzwerke gar nicht verwendet, sondern die Textergänzungen einfach im Rahmen der zentralen Metanetzwerke mit ihren direkten Verknüpfungen ausgewürfelt. So war zwar ein sprachlich korrekter Text entstanden, dem aber jeder Sinnzusammenhang fehlte.

10 Das Spiel mit Gedankenbausteinen.

Es zeigt sich, dass die Repräsentationen von ganzen Sätzen oder größeren Texten, die auf den wesentlichen Inhalt reduziert sind, genauso genutzt werden können wie die Repräsentationen von einzelnen Worten im Interface. Sie sind dann vielfach verwendbare Elemente des Denkens, die im Netzwerk immer wieder aktiviert und miteinander verbunden werden können. (Die Wort-Tasten in der Interface-Schicht werden also noch in riesigem Umfang durch Gedanken-Tasten ergänzt).

Sicher wird man zuerst Zweifel haben, wenn man bisher von der Vorstellung einer unbegrenzten Menge an möglichen Gedanken ausgegangen ist, dass es praktisch doch nur eine begrenzte Anzahl aller Gedanken geben soll. Aber die Grenze liegt sehr hoch. Schon die Anzahl aller Worte in der Interface-Schicht ist mit mehreren hunderttausend Worten sehr groß. Die Anzahl der Gedanken ist aber noch um ein Vielfaches höher als die Anzahl aller Worte. Ersichtlich hat die Natur hier, wie auch in anderen Fällen, keine Hemmungen, ein Problem einfach mit sehr vielen Elementen zu lösen. Das kann der Ingenieur oft nicht. Experimente ergaben (siehe vor allem [29]), dass sich im Modell die Anzahl der Gedankenneuronen ergibt, wenn man die Anzahl der Wortneuronen mit einem Faktor multipliziert, welcher der Anzahl der erforderlichen Abstraktionsebenen entspricht. Dieser, wegen der exponentiellen Abhängigkeiten nicht sehr große Faktor, bedeutet aber eine grundsätzliche Begrenzung!

Ferner ist noch zu bedenken, dass jeder Gedanke aus vielen Teilgedanken zusammengesetzt wird und dass sich wiederum umgekehrt jeder Gedanke in viele Teilgedanken auflösen und zu vielen verschiedenen gleichbedeutenden Textkonstruktionen führen kann.

11 Hochschulforschung und Ergebnisse.

Die bisherigen Experimente mit simulierten neuronalen Netzwerksystemen, in denen Texte bekannter Schriftsteller aufgenommen, verdichtet und wieder rekonstruiert wurden (vor allem in [29]), zeigten, dass die hier beschriebene Methode der Speicherung und Verarbeitung von sehr umfangreichen sprachlichen Informationen mit einem symbolfreien Neuronensystem möglich ist. Die biologische Struktur der Neuronen spielt dabei – ganz entgegen bisherigen Vermutungen – keine Rolle. In erster Näherung wurden nämlich Neuronen nur als Netzwerkknoten (mit Schwellencharakter) aufgefasst, bei denen vor allem ihre gegenseitigen Verbindungen im hierarchischen System wichtig sind. Wenn man jedoch meint, dass die Funktion allein im Netzwerk liegt (siehe das Zitat zu Anfang), hat man nur die halbe Wahrheit erkannt. Ohne die lernbaren unterschiedlichen Repräsentationen in den Neuronen ist eine Sprachverarbeitung kaum möglich.

Die anfänglichen Vorstellungen sind in sieben Doktorarbeiten [29,30,31,32,33,34,35] und in zwei begleitenden Büchern [36,37] dokumentiert. Weitergehende neue Erkenntnisse wurden in einem noch nicht veröffentlichten Manuskript „Wie kann das Gehirn überhaupt denken? – Mögliche Lösung des Rätsels durch neuronale Repräsentation von Sprache“ gesammelt. Auch ein kurzer Report on the Project ist inzwischen in Glottotheory erschienen [38]. Die Zukunft wird sicher noch größere Forschungsanstrengungen nötig machen, insbesondere zur Aufklärung von Lernprozessen, in denen Rückkopplungen, assoziative Prozesse und die Plastizität sicher eine große Rolle spielen werden. Auch die Berücksichtigung der Hebb'schen Hemmungen dürfte noch zur Verbesserung der Funktionsweise beitragen. Ein großes schon angesprochenes Problem ist noch völlig ungeklärt, nämlich die im menschlichen Gehirn stattfindende Beeinflussung des rationalen Denkens durch Emotionen und körperliche Signale, was im Modell bisher nur schematisch in Form von unspezifischen und veränderlichen Randbedingungen berücksichtigt werden konnte.

Zum Schluss noch einige Fragen, die hauptsächlich den Ingenieur interessieren. Welche Ziele könnte man mit Denkmachines nach menschlichem Vorbild besser erreichen als mit einem Computer? Nun, es sind alle Informationsverarbeitungen, bei denen man sich das Erlernen von ungezählten Grammatikregeln und die umfängliche Diskussion ihrer richtigen Anwendung ersparen möchte. Bei denen es also wesentlich um eine rasche Bildung und Verknüpfung von Gedanken geht. Das ist zum Beispiel bei der Übersetzung von Texten aus einer Sprache in eine andere Sprache der Fall [39]. Ebenfalls bei der „Live-Unterhaltung“ von zwei Menschen aus verschiedenen Sprachfamilien (z.B. japanisch und deutsch) mit Hilfe einer kleinen Denkmachine in der Tasche [zitiert in 37]. Oder bei der Rekonstruktion der Gedankenwelt eines nicht mehr lebenden bedeutenden Menschen, von dem man nur noch viele seiner Schriften kennt. Vielleicht käme man in fernerer Zukunft so noch zu lebendig wirkenden Diskussionen mit ihnen. Schließlich bei der Einrichtung einer weltweiten Gedankensprache nach dem grundsätzlichen Vorschlag des Philosophen G.W. Leibniz, den er schon vor über dreihundert Jahren machte [40]. Das könnte die politische Zusammenarbeit der Völker in aller Welt revolutionieren.

Sprache und Denken entwickeln sich gemeinsam. Der menschliche Geist ist daher im wesentlichen eine aktiv gewordene Teilwelt der Sprache. Man kann auch sagen, dass in unserem Inneren so etwas wie ein Sprachspiel stattfindet. Dass sich die Menschen auf diese Art mit der Sprache eine an die Wirklichkeit angenäherte aber gänzlich virtuelle Welt

erschaffen konnten (und das z.B. in der Literatur immer noch können) ist das - biologisch nicht zu erklärende - eigentliche Wunder.

Literatur

- [1] Polk, Th. Seifert, C. Cognitive Modeling, MIT Press Cambridge, 2002
- [2] Thompson, R. Das Gehirn, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1994
- [3] Anderson, J. Rosenfeld, E. Talking Nets MIT Press, 1998
- [4] Penrose, R. Computerdenken (The emperors's new mind), Spektrum Verlag, Heidelberg
- [5] Ratey, J. Das menschliche Gehirn. Piper Verlag, München, 2004.
- [6] Penrose, R. Schatten des Geistes, Spektrum Verlag, Heidelberg, 1995.
- [7] Calvin, W. Die Sprache des Gehirns, Carl Hanser Verlag, München, 2000.
- [8] Cruse, H. Dean, J. Ritter, H. Die Entdeckung der Intelligenz, dtv, München, 2001.
- [9] Churchland, P.S. Neurophilosophy (1986), sowie 2001 ein Interview mit dem Wissenschaftsjournalisten Markus Christensen (Institut für Neuroinformatik, Zürich) im Internet unter dem Stichwort Neurowissenschaft (Titel: Psychologie auf Neurowissenschaft zurückführen).
- [10] A.D. Friederici in an interview, Die Funktion liegt im Netzwerk, Gehirn und Geist, 7-8, 2011, S. 26-29.
- [11] Braitenberg, V. Schuez, A, Anatomische Betrachtungen des Cortex, Spektrum der Wissenschaft, Mai 1989, S. 74-86.
- [12] Minsky, M. The Emotion Machine. Simon & Schuster, New York, 2006
- [13] Rojas, R. Theorie der neuronalen Netze. Springer Verlag, Berlin 1996.
- [14] Mullins, J. Whatever happened to machines that think? The dream of artificial intelligence. New Scientist, 23. April 2005, pp. 32-37.
- [15] Kurzweil, R. Human 2.0, New Scientist, 24. September 2005, pp. 32-35.
- [16] Damasio, A., Descartes' Error, Penguin Books, London, 2005. Descartes Irrtum – Fühlen, Denken und das menschliche Gehirn. List Verlag, München, 2004.
- [17] Damasio, A. Selbst ist der Mensch - Körper und Geist Siedler Verlag, München 2011.
- [18] Bierbach, P. Wissensrepräsentation – Gegenstände und Begriffe, Diss. Uni Halle-Wittenberg, 2001.
- [19] Hilberg, W. The Unexpected Fundamental Influence of Mathematics upon Language. Glottometrics, 5, 29-50, 2002.
- [20] Hilberg, W. Some results of quantitative linguistics derived from a structural language model, Glottometrics 7, p. 1-24. 2004.
- [21] Hamming, R. Coding and Information Theory, Prentice Hall, 1986. Information und Codierung, 1987.
- [22] Küpfmüller, K. Grundlagen der Informationstheorie und der Kybernetik, in Allgemeine Neurophysiologie, Urban u. Schwarzenberg, München , 1971.
- [23] Hilberg, W. Generalizing the Mirror-Neuron-Model for Thinking Processes. HSI Conference, Catania, Italy, May 21-23, 2009, pp. 363-366. Modeling the Mind. Oral Presentation, (2009).
- [24] Hilberg, W. Sprache und Denken in neuronalen Netzen, Verlag für Sprache und Technik, Gross-Bieberau, 2008.
- [25] Wittgenstein, L. (1994), Philosophische Bemerkungen. Wiener Ausgabe, Verlag 2001, Frankfurt.
- [26] Römpf, G. Ludwig Wittgenstein, Böhlau Verlag, Köln, 2010, UTB
- [27] Frege, G. Begriffsschrift, 1879, Nachdruck Hildesheim, Olms 1998.
- [28] Whorf, B.L. Language, Thought and Reality, the MIT Press, Mass. 1956.
- [29] Ries, Th. (2001) Über Möglichkeiten einer maschinellen Nacherzählung mit Hilfe eines hierarchischen Systems aus Sprachnetzwerken, Diss. TUD.

- [30] Burschel, H.-D. (1998), Die messtechnische Ermittlung von Assoziationen zwischen Worten in kohärentem Text und ihre Nutzung bei Prädiktionen verschiedener Reichweite. Diss. TUD, Darmstadt.
- [31] Meyer, J. (1989) Die Verwendung hierarchisch strukturierter Sprachnetzwerke zur redundanzarmen Codierung von Texten, Diss. THD, Darmstadt.
- [32] Lamberti, H. Universelle Methoden einer strukturellen Textsegmentierung natürlicher Sprachen und Metasprachen, Diss. TUD, Darmstadt, 2005.
- [33] Nachtwey, V. Textkompression auf der Basis von Wortnetzwerken und Grammatikmodellen. Diss. THD, Darmstadt, 1995.
- [34] Steinmann, F.-M. Netzwerkmodellierung und Segmentierung von Texten sowie Anwendungen zur Informationsverdichtung. Diss. THD, Darmstadt, 1996.
- [35] Bassenge, G. Automatische Klassifizierung von Wortformen in Texten der deutschen Gegenwartssprache. Diss. TUD, Darmstadt, 2001.
- [36] Hilberg, W. Denken wie ein Mensch, Verlag für Sprache und Technik, Gross-Bieberau, 2005.
- [37] Hilberg, W. Eine echte Denkmaschine – Repräsentation und Manipulation von Worten und Gedanken in einem neuronalen Netzwerksystem, Naturwissenschaftliche Rundschau, Nr. 743, S. 240-245, Mai 2010.
- [38] Hilberg, W. An Artificial Brain that Can Learn and Use Any Language, in *Reports About Scientific Projects*, Glottotheory 2010, Number 3/2, pp 81-83.
- [39] Hilberg, W. Patentanmeldung DE 102008016368 A1. Übermittlung und Übersetzung von Text mit Hilfe von Sprachmaschinen.
- [40] Herring, H. (1992) G.W. Leibniz, Philosophische Schriften 4, Schriften zur Logik, darin: Anfangsgründe einer allgemeinen Charakteristik, Insel Verlag, Frankfurt.
- [41] Braitenberg, V. Pulvermüller, F. Entwurf einer neurologischen Theorie der Sprache. *Naturwissenschaften* 79, 103-117, Springer Verlag 1992.
- [42] Watzel, R. Erkennung dendritischer Spine-Synapsen in 3-dimensionalen Bildern eines konfokalen Laserabtastmikroskops. Diss. TU Darmstadt, 1999.
- [43] Wedeen, V. et al. DSI, *Science*, Bd. 335, S.1638, zitiert in Südd. Zeitung, 30.3. 20012, Seite 16.
- [44] Hilberg, W. *Digitale Speicher*, S. 244-276, Oldenbourg Verlag München 1987.

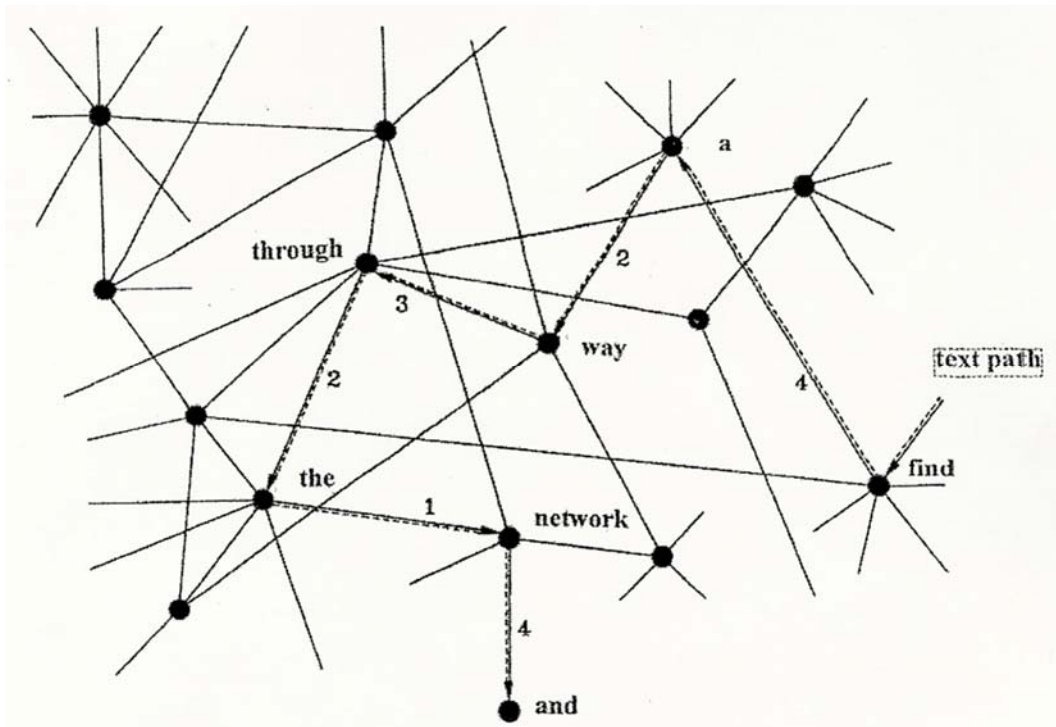


Bild 1 - Prinzip des Netzwerks für Worte im Interface in der graphischen Darstellung.

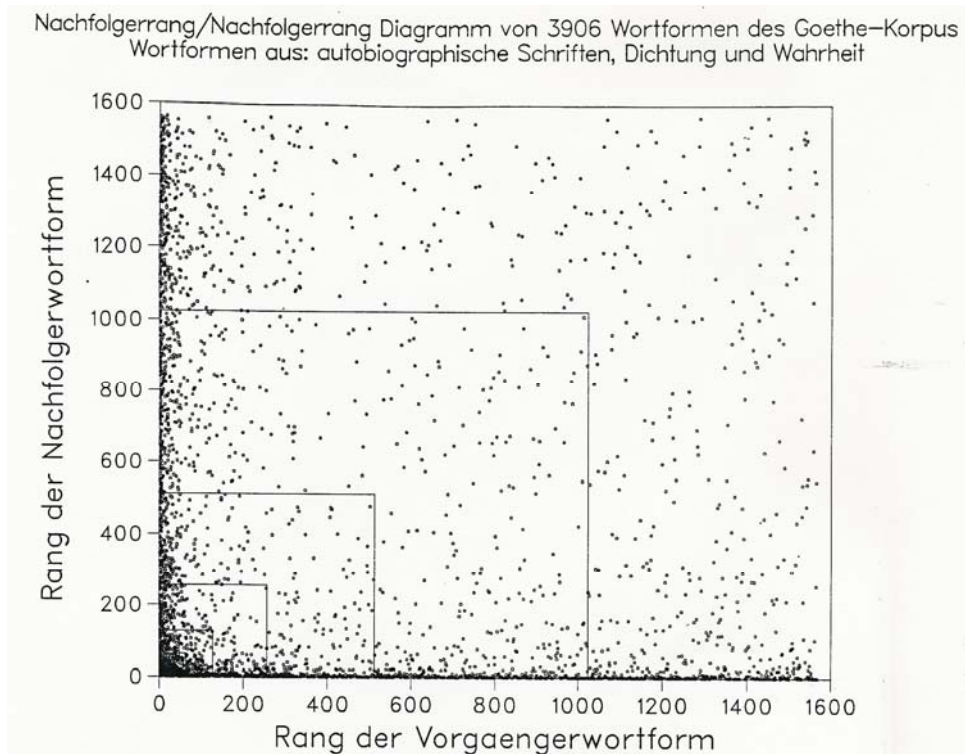


Bild 2 - Die Darstellung eines Netzwerks durch eine Verbindungsmatrix mit linearen Skalen.

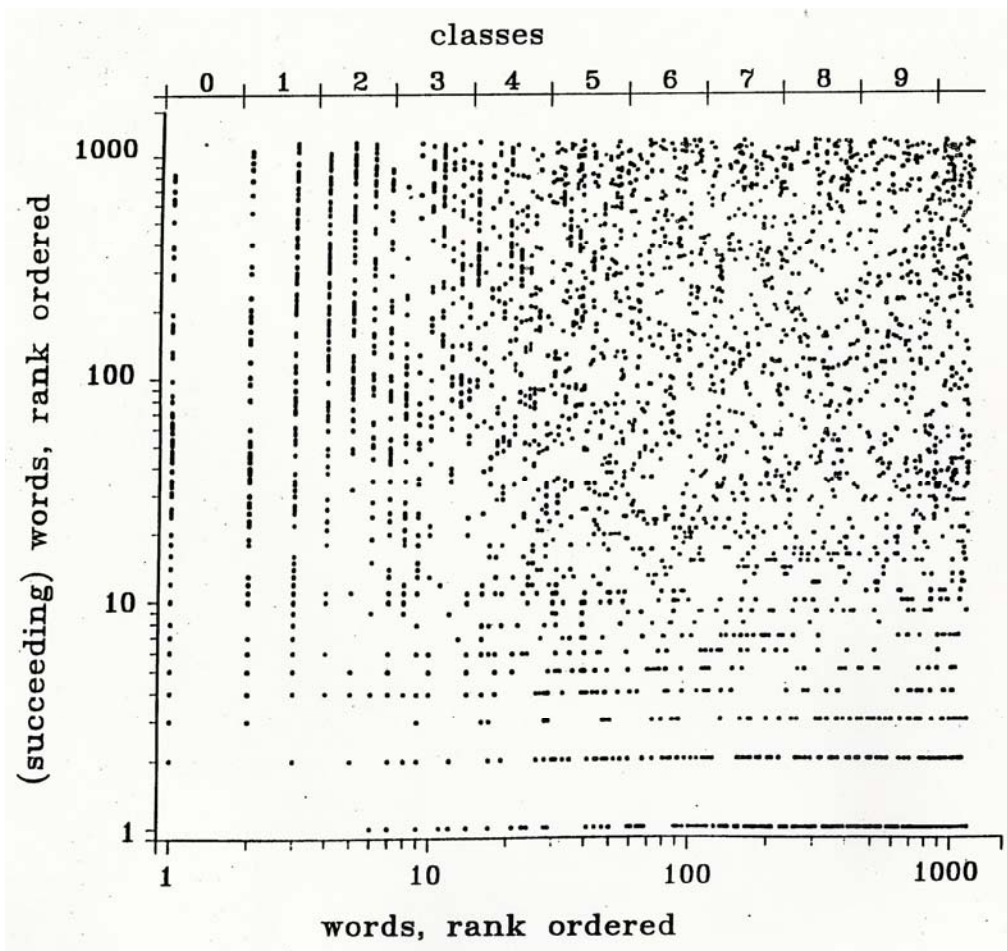


Bild 3 - Eine Verbindungsmatrix mit logarithmischen Skalen. Es ist keine statistische Verteilung von Punkten.

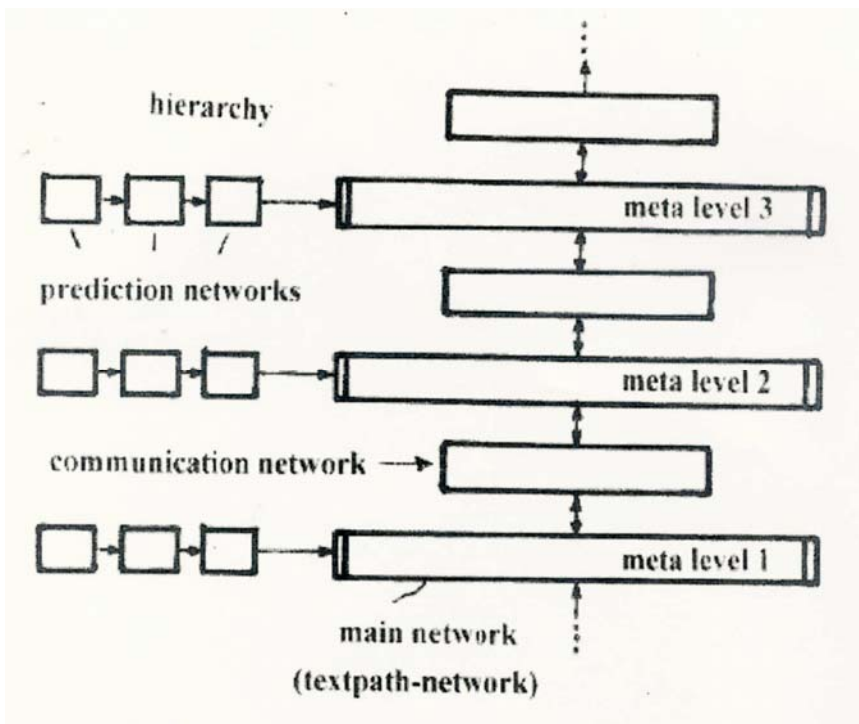


Bild 4 - Das hierarchisch angelegte Netzwerksystem mit Prädiktionsnetzwerken.