Karl Steinbuch, ein zu Unrecht vergessener Pionier der künstlichen neuronalen Systeme

Karl Steinbuch, an unjustly forgotten Pioneer of Artificial Neural Systems

Von Wolfgang Hilberg

Mitteilung aus dem Institut für Datentechnik der TECHNISCHEN HOCHSCHULE DARMSTADT

Übersicht:

Im Jahre 1961 veröffentlichte Karl Steinbuch einen Aufsatz über ein neuartiges neuronales System, das er die „Lernmatrix" nannte. Sie erregte eine gewisse Aufmerksamkeit, fiel aber nach einigen Jahren in Vergessenheit, nachdem Anhänger der künstlichen Intelligenz wie z.B. Minsky „überzeugend" nachgewiesen hatten, daß diese Strukturansätze nicht viel taugten. Eine gewisse Berechtigung hatte das zwar für die damals bekannten einschichtigen Perceptrons, Adalines usw., nicht jedoch für die Lernmatrix. Dies läßt sich zeigen, indem die ungewohnte Matrixdarstellung in die heute übliche Darstellung neuronaler Netze umgewandelt wird. Man erkennt ein Netzwerk, das fast identisch ist mit dem heute so erfolgreichen mehrschichtigen Perceptron. Es ist das Ziel dieses Aufsatzes, zum einen dem Erfinder Steinbuch noch zu Lebzeiten Gerechtigkeit widerfahren zu lassen und zum anderen, die verantwortlichen deutschen Forschungsförderer zum Nachdenken darüber zu bringen, wie man es in Zukunft vermeiden kann, Forschungspflänzchen zu rasch verdorren zu lassen, nur weil sie zu exzentrisch erscheinen.

Abstract:

In 1961 Karl Steinbuch published a paper on a novel neural system which he called "Lernmatrix". It attracted some attention but fell into oblivion very soon, in particular when supporters of artificial intelligence as e.g. M. Minsky demonstrated "convincingly" that these structural approaches were not worth much. In some respects it held true for the contemporary one layer perceptrons and adalines etc. but not for the multi layer "Lernmatrix". This can be shown by converting the unsual matrix representation into today's diagrams of neural networks. The result is a network which is almost identical with the main structure of present prevailing multi layer perceptrons. It is the object of this paper on the one hand to do the inventor Steinbuch justice in his lifetime and on the other hand to cause some reflections in German research administration peopel, how to avoid wrong decisions in future.

Für die Dokumentation:
Lernmatrix / Perceptron / Neuronen / Neuronale Netze / Hopfield-Netze

1. Einleitung

Es hat Jahrzehnte gedauert, bis Konrad Zuse in der angelsächsischen Welt als der Erfinder des Computers, genauer gesagt, der „programmgesteuerten elektronischen Rechenmaschine" anerkannt wurde. Ähnliche Zeiträume sind wohl auch nötig, bis Karl Steinbuch mit seiner grundlegenden Erfindung eines elektronischen neuronalen Systems, das er „Lernmatrix" nannte, Gerechtigkeit widerfährt. All das hat vermutlich mehrere Gründe. Dazu zählen a) daß man in der angelsächsischen Welt keine deutschen Zeitschriften und Bücher liest, aber auch b) daß deutsche Wissenschaftler inzwischen fast nur noch die angelsächsische Fachliteratur lesen.

Wie ist der Stand der Technik dieser „intelligenten" Systeme? Die künstlichen neuronalen Netze werden in aller Welt intensiv erforscht, entwickelt und eingesetzt. Ein Indikator dafür ist die große Zahl von Büchern, die weltweit über dieses Thema geschrieben und offensichtlich auch gelesen werden. Seltsamerweise kann man in kaum einer dieser oft sehr umfangreichen Darstellungen den Namen „Karl Steinbuch" lesen. Dies ist eine große Ungerechtigkeit, denn er hat um das Jahr 1960 die ersten technisch brauchbaren neuronalen Systeme erfunden, erprobt und beschrieben [1, 27].

Seine erste Veröffentlichung über dieses Thema erschien im Januar 1961 in der Zeitschrift Kybernetik und hatte den Titel „Die Lernmatrix" [1]. Dem heutigen Sprachgebrauch folgend würde man ihn jetzt, rund 30 Jahre später, wohl anders wählen, vielleicht: „Das adaptive künstliche neuronale Netzwerk". Genau das, nämlich ein technisch brauchbares elektronisches System zur parallelen Verarbeitung analoger oder digitaler Datenmengen nach dem Vorbild biologischer Systeme hat er nämlich damals vorgestellt. Wie man erkennen wird, werden mit seinem System die Begrenzungen überwunden, die einem Vorgängermodell, dem sogenannten (ursprünglichen) „Perceptron" noch anhafteten. F. Rosenblatt, der Erfinder des Perceptrons hatte kurz zuvor, 1958, unter dem Titel "The Perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain" [2] ein System vorgestellt, das eine nicht unwesentliche Verbesserung der sehr frühen Ansätze von McCulloch und Pitts aus den vierziger Jahren [3] darstellte. Zusätzlich zu den Neuronen und ihren Schwellwerten hatte er noch „Gewichte" (lineare Widerstände) vorgeschlagen. Dieses ursprüngliche Perceptron, ebenfalls wie die sehr ähnliche Anordnung ADALINE von B. Widrow aus dem Jahre 1960 [20] unterscheidet sich in einem wichtigen Detail von den heutigen praktisch eingesetzten Perceptrons. Es ist nur eine einschichtige Anordnung, die, wie man heute genau weiß, nur eine beschränkte Leistungsfähigkeit hat. Hätte man in der internationalen wissenschaftlichen Welt damals die publizierten Überlegungen und Vorschläge von

Karl Steinbuch genügend studiert und beachtet, wäre es nicht 1969 zu dem bekannten vernichtenden Verdikt von Minsky und Papert über die neuronalen Netzwerke gekommen [10], welches die Entwicklung auf diesem Bereich der Technik, wie man heute allseits beklagt, um Jahrzehnte verzögert hat.

Die fünfziger und sechziger Jahre waren eine Zeit reger Aktivität bei interessierten Technikern und Wissenschaftlern auf dem Gebiet der „intelligenten" elektronischen Systeme, die nicht sehr zahlreich und zudem noch über die ganze Welt verstreut waren. So ist in Deutschland vor allem Karl Steinbuch zu nennen, der den meisten heutigen Computertechnikern wohl nur noch als Erfinder des Begriffs „Informatik" bekannt sein dürfte. (Die Wortschöpfung präsentierte er im Jahre 1957 in einem entsprechenden Aufsatz [21] als Kurzform für „automatische Informationsverarbeitung". Sie hat sich in der Folgezeit sehr rasch durchgesetzt und zu gleichnamigen Fachbereichen an den Universitäten geführt. Ihr Erfinder verblieb aber später als Hochschullehrer zeitlebens in der heimatlichen Elektrotechnik.) Auch Karl Küpfmüller ist als einer von denen zu nennen, die sich frühzeitig dem Problem der Informationsverarbeitung durch den Menschen zugewandt hatten. Er veröffentlichte z.B. 1959 in der NTZ einen diesbezüglichen Aufsatz [9]. In seinem Institut wurden seinerzeit in diskreter Technik elektronische „Neuronen" entwickelt und gebaut, je ein Neuron auf einer Platine, wie sie später Franz Jenik beschrieben hat [12, 16, 17].

2. Die Lernmatrix

Wir brauchen hier an dieser Stelle nicht die umfangreichen Erklärungen zu wiederholen, mit denen Karl Steinbuch damals sein neuartiges System begreiflich machen mußte, denn wir können heute sein System einfach in die Sprache der jetzt weithin bekannten neuronalen Netzwerke übersetzen. Insbesondere brauchen wir nicht auf den „Pawlow'schen bedingten Reflex" näher einzugehen, eine Vorstellung, die auf ein berühmtes Experiment eines russischen Forschers zum Thema „Lernen" zurückgeht [13], siehe **Bild 1** (aus [1]), welche auch den Ausgangspunkt der Überlegungen von Steinbuch bildete. Heute dagegen scheint der „Pawlow'sche Reflex" seine Attraktivität eingebüßt zu haben und nicht mehr die Leitidee zu sein, welche die Phantasie von Wissenschaftlern und Technikern beflügelt, die sich mit „intelligenten Maschinen" beschäftigen. Dies mag man beklagen, aber es ist offensichtlich eine Tatsache.

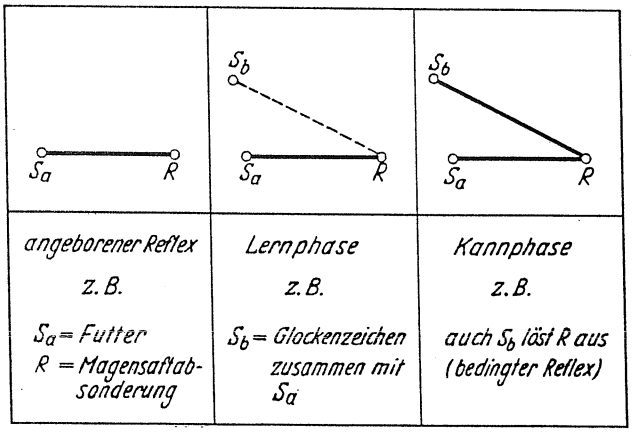


Bild 1: Schema zum Versuch von I.P. Pawlov nach [1]

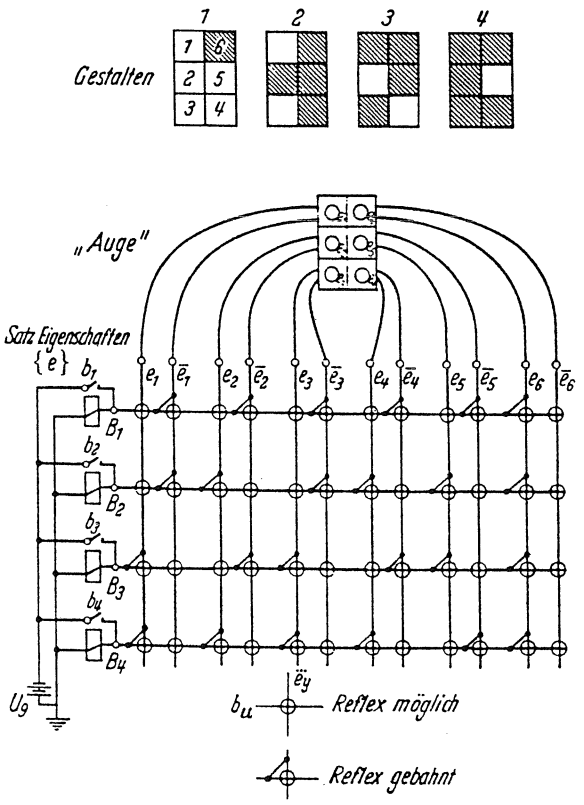
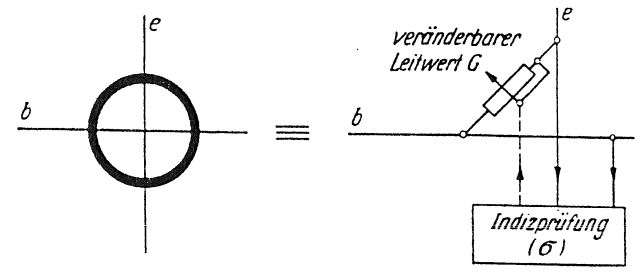


Bild 2: Prinzip der Lernmatrix nach [1]

Bild 2 zeigt die originale Darstellung aus Steinbuchs Aufsatz, mit der das Prinzip der „Lernmatrix" erläutert wird. Man erkennt eine Matrix aus Zeilen und Spalten und an den Kreuzungspunkten kreisförmige Elemente, deren Funktion in Bild 3 näher erläutert wird. Bleiben wir zunächst bei Bild 2. Hier fällt auf, daß die vertikalen Leitungen paarweise ausgebildet sind, um mit komplementären Signalen (sie heißen im betrachteten Aufsatz verallgemeinernd „kontradiktorisch") arbeiten zu können. Mehrere Objekte, die hier „Gestalten" heißen, werden von einem elektronischen Auge betrachtet, welches die Bildelemente (schwarze oder weiße Quadrate) in elektrische Signale *e* umwandelt. Das sind jetzt die eigentlichen elektronischen Eingangssignale, die „Eigenschaften" genannt werden. An den Spaltenleitungen werden nach links die Ausgangssignale abgegeben. Sie heißen „Bedeutungen" *b*. Nach Zuführen eines Satzes von „Eigenschaften" *e* entsteht ein Satz von „Bedeutungen" *b*. Das jeweils größte Bedeutungssignal wird von einem besonderen (Relais-) Mechanismus ausgewählt; die kleineren Signale werden unterdrückt.

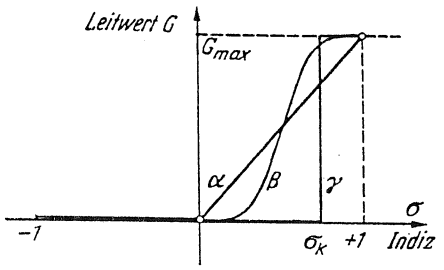
Für den binären Fall sind solche Matrizen heute als „assoziative Festwertspeicher" bekannt [5]. In den fünfziger Jahren hießen sie „Zuordner" oder „Decodierschaltungen". Das Neue an Steinbuchs Lernmatrix ist aber, daß als Matrixelemente nicht nur Dioden mit der bekannten Richtwirkung und den exponentiellen Kennlinien zugelassen werden, sondern auch Elemente mit ganz anderen Kennlinien. Ferner, daß die Ausgangssignale sich aus einer Summe von Strömen ergeben, wobei sich jeder Strom aus dem Eingangssignal *e* und dem zugehörigen nichtlinearen Matrixelement bestimmt. Schließlich werden auch analoge Eingangssignale zugelassen. Man erkennt in Bild 2, daß alle Ströme, die von einer Zeile von Matrixelementen kommen, von einer zugeordneten Zeilenleitung gesammelt werden. Die Zeilenleitung gibt die Summe der Ströme nach links an den Ausgang weiter.



a. Ersatzschaltbild

b	0	0	1	1
e	0	1	0	1
Indiz σ	unverändert		verkleinert	vergrößert (maximal σ=1)

b. Funktionstabelle



c. Kennlinie

Bild 3: Zur Erklärung des „Bedingten Reflexes" nach [1]

Realisiert werden die Matrixelemente durch veränderbare Leitwerte. **Bild 3** zeigt unter c einige Kennlinien. Hier findet man lineare Widerstände, Elemente mit einer horizontal verschiebbaren Treppenstufencharakteristik (Sprungfunktion) und Elemente mit einem abgerundeten Treppenstufenverlauf, ebenfalls mit einstellbarer Schwelle und Begrenzung nach oben. Insbesondere die letztgenannte Kennlinie, die heute die „Sigmoidfunktion" heißt, ist wegen ihrer Differenzierbarkeit bei der Ausgestaltung von Lernalgorithmen interessant und z. B. auch bei den heute angewandten neuronalen Netzwerken von großer Wichtigkeit geworden (Stichwort Backpropagation), siehe z. B. in [6] oder [8].

Wir können jetzt daran gehen, die Schaltung von Bild 2 in einer Weise umzuzeichnen, wie sie heute für neuronale Netze üblich geworden ist. Man findet, daß jede Zeile einer Lernmatrix einem sog. „Neuron" entspricht, denn dieses künstliche Neuron hat im wesentlichen die Funktion der Summation von Eingangsströmen. Wir zeichnen es wie üblich als Kreis, siehe **Bild 4a.** Die veränderbaren und im allgemeinen nichtlinearen Leitwerte, welche die Eingangsströme bestimmen, sind in diesem Bild als vorgeschaltete Kästchen mit nichtlinearen Kennlinien dargestellt (diese Kennlinien können in einem Lernprozeß in beiden Koordinatenrichtungen verändert, d. h. skaliert werden). Vom „Neuron" geht es direkt an den Ausgang b (Bedeutung), wobei wir den Mechanismus der Klassifizierung in der Menge der Ausgangssignale aller Neuronen (Hervorheben des größten Signals und Unterdrückung der übrigen) zunächst nicht betrachten müssen. Zum Vergleich ist die bekannte „Neuronenschaltung" des Perceptrons von Rosenblatt in **Bild 4b** dargestellt, wobei die Eingangssignale *e* jetzt „Merkmale" heißen und das Ausgangssignal *d* Bestandteil des „Klassenvektors" ist. Es sei auch darauf hingewiesen, daß erst Minsky und Papert 1969 die heute übliche formalisierte Darstellung des Grundgedankens des Rosenblatt'schen Perceptrons eingeführt hatten [10]. (Diese historischen Zusammenhänge wurden von R. Rojas in dem Buch „Theorie der neuronalen Netze" [6] ausführlich dargestellt.) Man erkennt beim Vergleich der Bilder 4a und 4b, daß der wesentliche Unterschied zwischen den Grundschaltungen der „Lernmatrix" und des „Perceptrons" darin besteht, daß die nichtlinearen Elemente sich einmal an den Eingängen und einmal am Ausgang befinden. Zudem werden die linearen Gewichte und die Sigmoid-Funktion, die man bei dem Perceptron findet, bei der Lernmatrix gewissermaßen in einer einheitlichen Sorte von Elementen, den nichtlinearen sog. „Leitwerten" zusammengefaßt, die aber – und das ist ein wichtiger Unterschied – in allen Parametern individuell einstellbar sind. Das ergibt eine größere Variabilität als beim Perceptron. Man erkennt spätestens an dieser Stelle, daß Karl Steinbuch von Hause aus ein Elektronik-Praktiker ist, denn im Gegensatz zu manchen anderslautenden Bemerkungen in der Literatur lassen sich nichtlineare Widerstände in der Praxis meist recht einfach realisieren; sie sind geradezu der Normalfall, während lineare Widerstände, insbesondere in der integrierten Halbleiter-Technik, wegen des großen Platzbedarfes nach Möglichkeit vermieden werden müssen. Andererseits ist es für die heute von Theoretikern fast ausschließlich angewandte Simulation solcher künstlichen Neuronen und

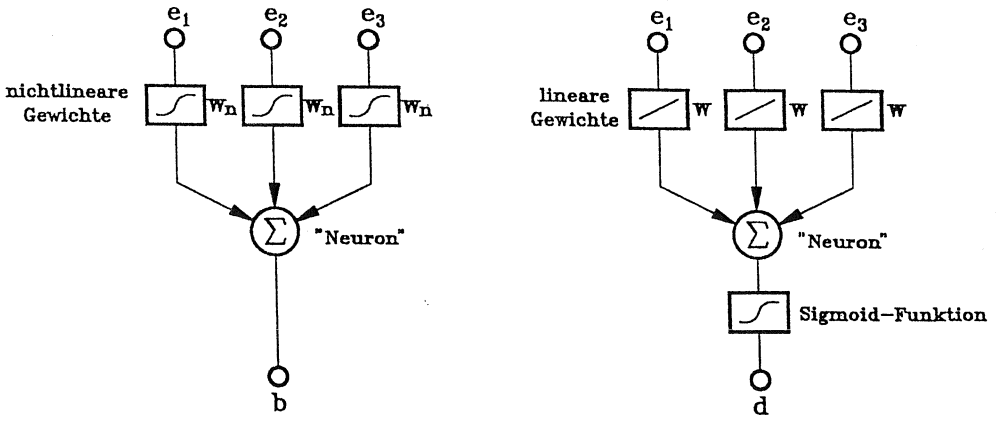


Bild 4: Gegenüberstellung der Prinzipien von a) Lernmatrix und b) Perceptron

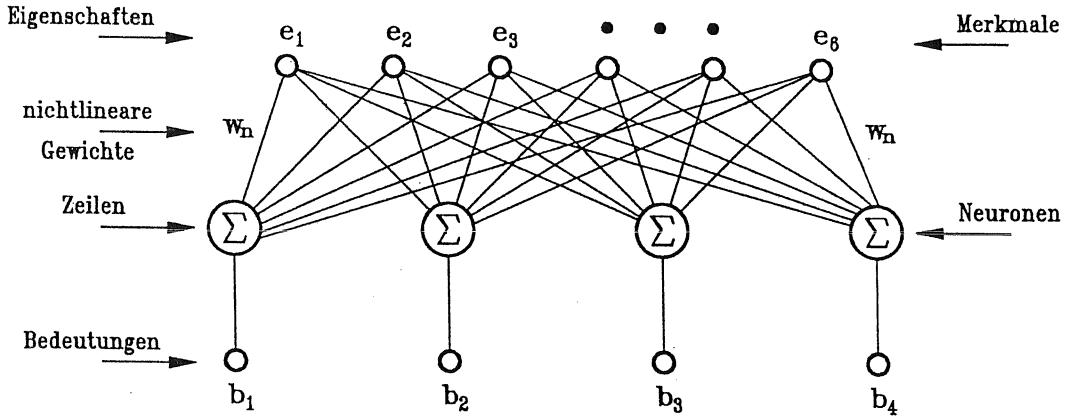


Bild 5: Darstellung der Lernmatrix als Neuronenschicht

Neuronensysteme günstiger, eine nichtlineare Kennlinie wie beim Perceptron nur ein einziges Mal pro Neuron nachbilden zu müssen.

Wir sind jetzt soweit, die gesamte Lernmatrix als eine einzige „Neuronenschicht" zeichnen zu können, siehe **Bild 5.** Zur übersichtlicheren Darstellung sind statt der Leitungspaare e und $\bar{e}$ wiederum wie in Bild 4a nur einfache Leitungen gezeichnet worden. Man vergewissert sich leicht, daß jede Eigenschaft bzw. jedes Merkmal, das in der Lernmatrix von Bild 2 als Leitungspaar e_i und $\bar{e}_i$ von oben kommend jeder Zeile zugeführt wird, jetzt auch allen durch Kreise dargestellten „Neuronen" zugeführt worden ist. Wie bei Perceptrons üblich, wurde auch in dieser Darstellung auf die Zeichnung von Kästchensymbolen für die Gewichte verzichtet. Gewichte sind gewissermaßen Eigenschaften der Verbindungsleitungen. Man pflegt sie lediglich durch das Symbol „w" anzudeuten. Es sei noch nachgetragen, daß der von Steinbuch beschriebene Relais-Mechanismus am Ausgang zur Hervorhebung des größten Signals und der Unterdrückung der übrigen Signale einem besonders intelligenten Schwellenelement entspricht. Es ist auch nicht eigens gezeichnet. Sein Schwellenwert ist an das jeweilige Maximum angepaßt, und die übrigen Ausgangssignale werden von ihm vollständig unterdrückt. Das ist ersichtlich das heute viel zitierte Prinzip „winner takes all". (Der Relais-Mechanismus wurde später mit einfachen Transistorschaltungen realisiert [22, 23, 24].)

Ein weiterer wichtiger Punkt in dem betrachteten Aufsatz von Steinbuch ist der Vorschlag, solche Lernmatrizen hierarchisch in Schichten zu realisieren, siehe **Bild 6.** Zeichnen wir dieses Bild ebenfalls mit den üblichen Neuronenkreisen um, so finden wir die Darstellung von **Bild 7.** Ein Vergleich mit den heutigen Darstellungen eines mehrschichtigen Perceptrons, siehe z.B. in **Bild 8,** zeigt die Übereinstimmung. Wir sollten dabei nicht übersehen, daß in Bild 7 die Widerstände (Gewichte w_n) nichtlinear sind und die Sigmoidfunktion deshalb am Ausgang fehlen darf, während in Bild 8 die Widerstände (Gewichte w) linear sind und die Sigmoidfunktion nach jedem Neuron zwar vorhanden, aber nicht ausdrücklich gezeichnet ist. Vielfach wird speziell bei Perceptrons auch die Verabredung getroffen, daß diese Sigmoidfunktion in dem Kreis-

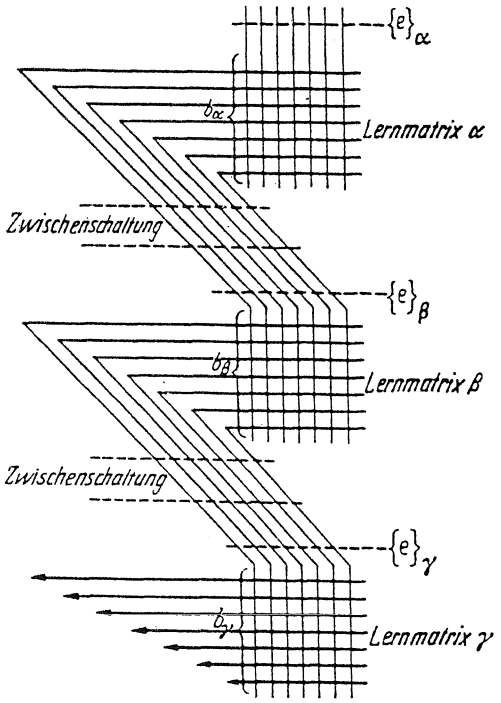


Bild 6: Schichtung von Lernmatrizen nach [1]

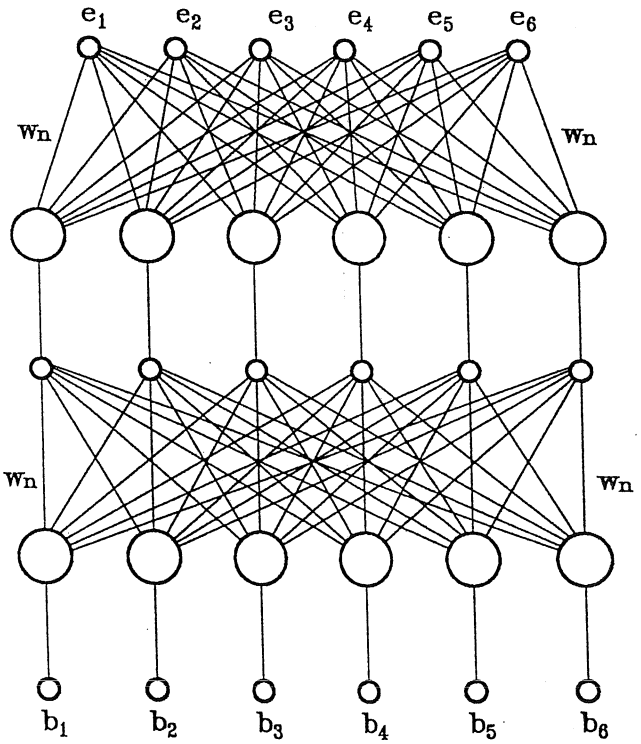


Bild 7: Mehrebenen-Modell von Bild 6 in der Neuronen-Darstellung

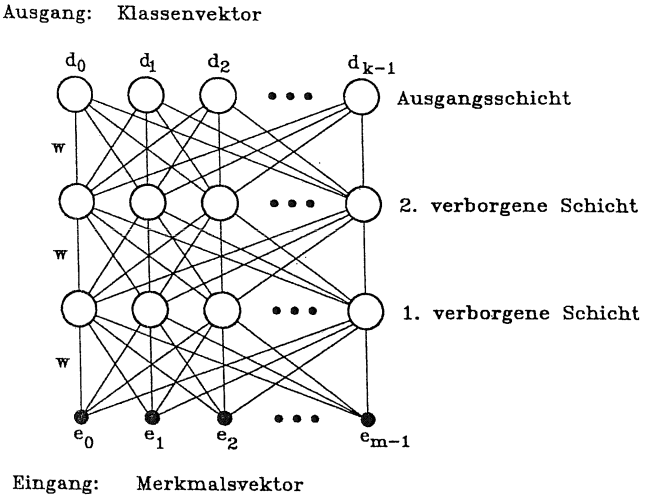


Bild 8: Prinzip des Perceptrons mit einigen verdeckten Schichten

symbol des Neurons eingeschlossen sei. Entsprechend kann man bei den Lernmatrizen verabreden, daß in der vereinfachten Zeichnung der Neuronen auch die Maximumbestimmung eingeschlossen ist.

Man beachte, daß erst Rumelhardt 1986 solche Schichten in die Diskussion eingeführt hat [7], womit er die Einwände von Minsky und Papert widerlegen konnte.

3. Der Lernalgorithmus

Die Darstellung der Lernphase beschränkt sich bei Steinbuch zunächst auf das Prinzipielle [1]. Dem System müssen sowohl die Eigenschaften e als auch die Bedeutungen b zugeführt werden. Dabei werden die Matrixelemente in ihren Werten verändert. Erst wenn eine Vielzahl von solchen Lernvorgängen abgelaufen ist, wird sich eine ausreichende Veränderung der Matrixelemente ergeben haben, die zur Folge hat, daß zu jedem gelernten Eigenschaftssatz die zugeordnete Bedeutung ausgegeben wird. Die beiden „kontradiktorischen" Leitungen für jedes Eigenschaftssignal *e* repräsentieren dabei die fördernden und hemmenden Einflüsse, die man auch von den biologischen Neuronen kennt (Hebb'sche Lernregel).

In seinem Buch [4] zeigt Steinbuch einige Jahre später eine Möglichkeit auf, wie man den Lernprozeß noch steuern kann. Dabei wird die Größe der Lernschritte durch einen sog. h-Eingang mit einem kontinuierlich veränderbaren Signal eingestellt. Die Intensität des Lernens wird auch heute in den Lernalgorithmen berücksichtigt. Allerdings findet man nicht mehr so schöne Sprachschöpfungen wie „Lustfunktion" [4].

Die physikalischen Mechanismen einer Adaption der nichtlinearen Gewichte in der Matrix werden von Steinbuch in seinem Aufsatz gegen Ende noch ausführlich behandelt. Bedenkt man die seither erfolgte jahrzehntelange Weiterentwicklung der Technologien der Informationstechnik, so wird uns dieser Teil seiner Arbeiten heute nicht mehr so sehr interessieren. Manches ist obsolet geworden, wie z. B. die Ferritkerntechnik, und anderes wiederum, wie z. B. die Halbleitertechnik, hat sich in ungeahnter Weise fortentwickelt. Dennoch hatten auch diese Überlegungen von Steinbuch damals ihren Wert. Zeigten sie doch jedem Fachmann, daß die vorgeschlagenen Systeme, wenn man den Aufwand nicht scheute, sich tatsächlich in Hardware realisieren ließen. Dies war ein entscheidender Gesichtspunkt, denn die kleinen billigen Computer für die Simulation solcher Systeme gab es ja damals noch nicht. In diesem Zusammenhang ist auch folgendes zu sehen. Rosenblatt und Steinbuch haben beide noch keine Algorithmen angegeben, mit denen man zielstrebig eine optimale Besetzung der Gewichtsmatrix findet. Das ist erst in neuerer Zeit gelungen, siehe unter dem Stichwort „Backpropagation" in [6, 7, 8, 14]. Seien wir nicht unbescheiden. Schließlich kann man nicht gleich alles von den Pionieren einer neuen Technik verlangen!

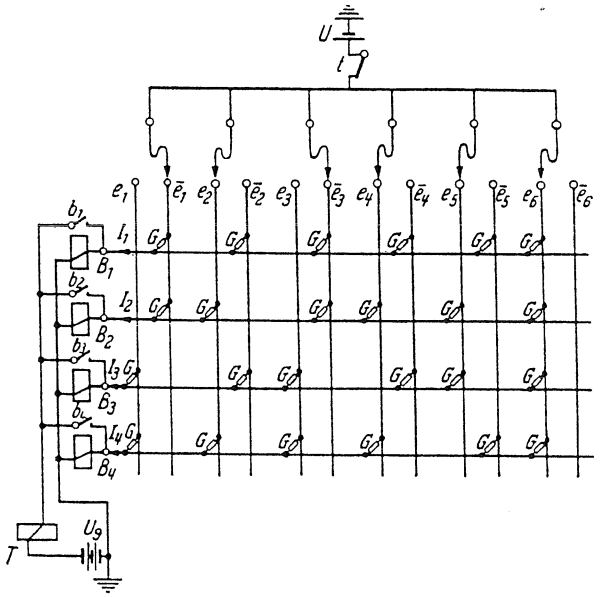


Bild 9: Prinzip der Bedeutungsmatrix nach [1]

4. Die Kann-Phase: Erkennung von ähnlichen Gestalten

Sobald die Lernphase abgeschlossen ist, kann das Steinbuch'sche System eingesetzt werden. Dann ist das System in der „Kannphase". Steinbuch ist gewissermaßen gezwungen gewesen, einen solchen Begriff einzuführen, weil man sonst logisch vermuten könnte, daß seine „Lernmatrix", wie der Name sagt, nur lernen könne. Das ist natürlich nicht der Fall, denn es wird hier nur „gelernt", um nachher etwas zu „können". Es ist nur konsequent, wenn Steinbuch der Lernphase die Lernmatrix zuordnet und der Kannphase eine Bedeutungsmatrix, siehe **Bild 9.** Trotzdem ist eine solche Unterscheidung für den Leser zuerst eher verwirrend, denn die Matrix bleibt dieselbe. Dies wird Steinbuch wohl auch im Grunde gewußt haben, denn er hat den Aufsatz ja mit „Die Lernmatrix" überschrieben.

Es ist interessant, daß man bei den Perceptrons eine entsprechende Begriffsunterscheidung mit prägnanten Worten nicht durchgeführt hat, obwohl die Vorgänge des Lernens und Könnens hier natürlich genauso aufeinander folgen.

Die besondere Eigenschaft der Perceptrons und Lernmatrizen, nicht nur die erlernten Muster (Gestalten, Merkmalsätze) zu erkennen, sondern auch ähnliche Muster, hat die Fachwelt wohl am meisten fasziniert. Dies ist ein Punkt, der auch heute noch nicht abschließend erforscht ist, denn so frappierend auch manche Leistungen der Erkennung von ähnlichen Objekten sind, siehe z. B. S. Vey [19], so unbefriedigend bleibt es doch, wenn das

System unvermutet eine falsche Zuordnung eines vorgegebenen Musters vornimmt oder überhaupt nicht erkennt, daß es sich um etwas handelt, das nicht in den vorgegebenen Zusammenhang paßt. Hier sind auch die heutigen „geschichteten Neuronensysteme" einfach nicht intelligent genug, woraus sich erklären läßt, daß weltweit immer neue Varianten des Perceptrons oder des Hopfield-Netzes vorgeschlagen werden, siehe z.B. in [6, 8]. Wirklich grundsätzlich neue Strukturen findet man in der Literatur selten.

5. Rückkopplung

Es ist ein altes und bewährtes Prinzip der Nachrichtentechnik, bei einem System mit gegebenem Eingang und Ausgang auch immer einmal zu untersuchen, welches Verhalten sich ergibt, wenn man den Ausgang wieder mit dem Eingang verbindet. Dieses Prinzip nennt man die Rückkopplung, wobei hier auf die Feinheiten wie positive oder negative Rückkopplung nicht eingegangen werden soll. Auf diese Weise hat man z.B. die Oszillatoren erfunden, oder die binären Speicherelemente (Flipflops) oder, wenn man auf höhere Abstraktionsstufen geht, das Modell eines digitalen Rechenautomaten, siehe z.B. in [15]. Wie sieht es nun bei den neuronalen Netzen aus?

Betrachten wird das Netzwerk in **Bild 10.** Es ist offensichtlich eine einzelne Neuronenschicht des Perceptrons, bei dem diesmal die Schicht senkrecht gezeichnet ist und bei der die Ausgänge mit den Eingängen verbunden sind. Diese Schaltung läßt sich auch in Matrixform darstellen, siehe **Bild 11.** Die rückgekoppelte Schaltung hat selbstverständlich auch wiederum Eingänge und Ausgänge, die hier, wie zu sehen, hinzugefügt worden sind. Bedeuten die Matrixelemente lineare Widerstände (Gewichte w) und sollen in den Neuronensymbolen jeweils außer der Summenfunktion noch eine Sigmoidfunktion mit einer verschiebbaren Schwelle enthalten sein, nennt man das resultierende neuronale Netzwerk nach seinem in der angelsächsischen Literatur bekannten Erfinder ein Hopfield-Netz [11, 28], siehe **Bild 12.** Interpretieren wir jedoch die Matrixelemente als nichtlineare Widerstände w_n mit Schwellen, so verbleibt im Neuron nur noch die Summenfunktion. Es ist dann eine äquivalente rückgekoppelte „Lernmatrix". Solche Schaltungen finden wir in der Tat in Steinbuchs Schriften, siehe z.B. **Bild 13** [4]. Eine Pufferschaltung zwischen Eingang und Ausgang ist für synchrone Schaltungen eine praktische Notwendigkeit und hat

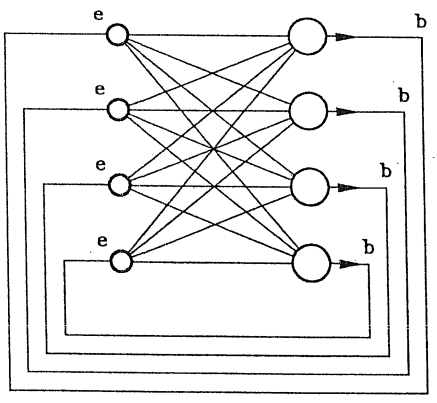


Bild 10: Neuronen-Schicht mit Rückkopplung

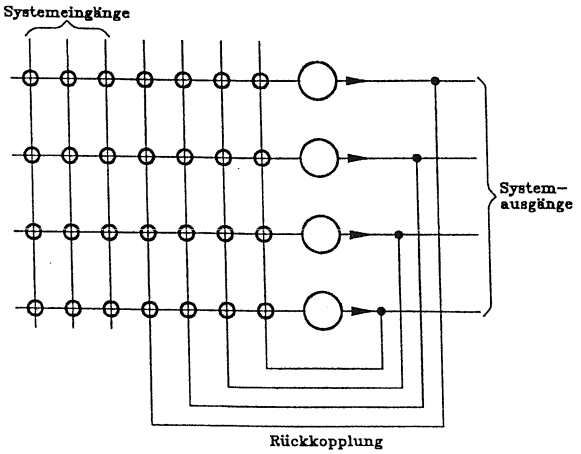


Bild 11: Darstellung der rückgekoppelten Schaltung von Bild 10 in Matrixform

keine grundsätzliche Bedeutung. (Nur bei asynchronen Schaltungen wie beim Hopfield-Netz können solche Puffer bei Vorhandensein von Laufzeiten entfallen.) Die Einführung einer weiteren Neuronenschicht in einem

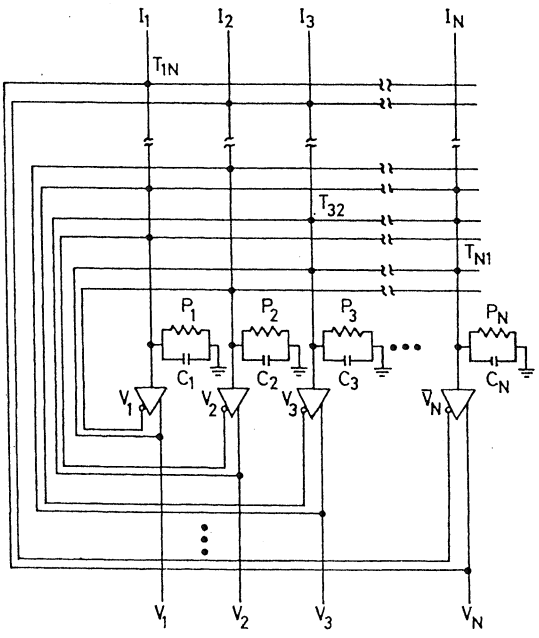


Bild 12: Ausführlichere Darstellung eines neuronalen Netzwerkes nach [28]
a) elektrisches Schaltbild, b) Schwellenfunktion

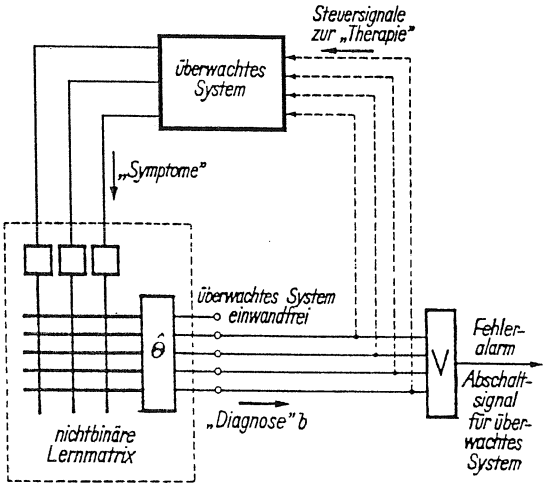


Bild 13: Prinzip eines selbstprüfenden und selbstreparierenden Systems nach [4]

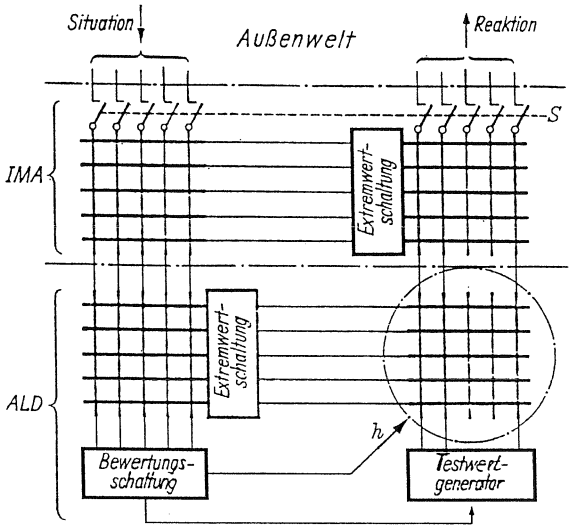


Bild 15: Lernsystem mit anpassungsfähigem internen Modell der Außenwelt nach [4]

Hopfield-Netz wird heute als eine Verallgemeinerung dieses Modells bezeichnet und seltsamerweise mit dem Namen „Bidirectional Associative Memory (BAM)" belegt. Offenbar hat man bei der Erfindung dieses Namens nicht gleich gesehen, daß sich eine bidirektionale Anordnung sofort in eine rückgekoppelte Anordnung umzeichnen läßt, siehe **Bild 14** [26]. Natürlich sind solche Schaltungen von großem Vorteil, weil damit verschiedene Einflüsse getrennt voneinander verarbeitet werden können. Steinbuch hatte dies offensichtlich als erster erkannt und in vielen Varianten diskutiert [1, 4]. So findet man z.B. Serienschaltungen von jeweils zwei, vier oder mehr Lernmatrizen, die mit einer Rückkopplung versehen sind, siehe z.B. **Bild 15**.

Zwischen dem Perceptron und dem Hopfield-Netz gibt es Gemeinsamkeiten und Unterschiede. Will man mehr die Unterschiede betonen, hört man oft die Bemerkung, daß das Hopfield-Netz eigentlich ein Abkömmling des klassischen assoziativen digitalen Speichers sei. Dem kann man zwar grundsätzlich zustimmen, aber diese Bemerkung läßt gleichzeitig auch erkennen, daß man offenbar, vertraut mit der üblichen Perceptron-Darstellung, in einer Matrixdarstellung wohl immer noch etwas Fremdes sieht. Das ist nicht gerechtfertigt. Die Darstellungsform ist vielmehr grundsätzlich bedeutungslos und kann beliebig gewählt werden. Lediglich bei großen Systemen mit sehr vielen Gewichten ist die übliche Perceptron-Darstellung nicht durchführbar, und es empfiehlt sich die übersichtlichere Matrixdarstellung.

In allen Fällen werden übrigens im neuronalen System Daten bzw. Informationen gespeichert. Bei dem Perceptron und dem Hopfield-Netz in den linearen Gewichten (jeweils ein Wert w) und bei der Lernmatrix in den nichtlinearen Gewichten mit ihren wenigstens zwei Kennlinienparametern (Verschiebung und Stufenhöhe). Bei rückgekoppelten Systemen darf man jedoch folgendes nicht außer acht lassen. Auch in den verschiedenen Konfigurationen, in denen eine Rückkopplung stabil sein kann, d.h. in denen sie gewissermaßen „einrastet", wird Information gespeichert. Das ist die zusätzliche Information über den Zustand des Systems. Da es viele solcher Zustände gibt, kann man sich das als eine Verallgemeinerung der bistabi-

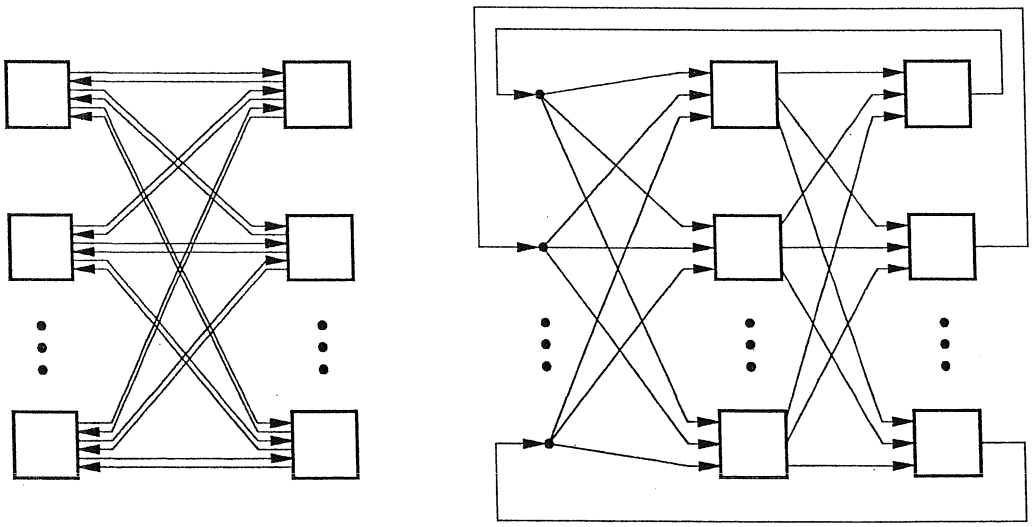


Bild 14: Veranschaulichung der Äquivalenz eines a) bidirektionalen neuronalen Systems (BAM) mit b) einem rückgekoppelten neuronalen System

len Kippschaltungen (Flipflop) vorstellen. Das Hopfield-Netz oder die rückgekoppelte Lernmatrix, digital betrieben, wäre demnach einfach eine *n*-dimensionale Erweiterung des bekannten Flipflop-Prinzips, eine Vorstellung, die sicherlich für den Elektrotechniker viel anschaulicher ist als die dem Physiker so hilfreiche Veranschaulichung mit Spin-Mechanismen, siehe z. B. in [18].

Im übrigen findet man bei Steinbuch noch eine Fülle von verschiedenen Kombinationen der Lernmatrizen [4], von denen heute, rund dreißig Jahre nach seiner Veröffentlichung, gewiß die meisten wohl noch nicht näher untersucht sind.

6. Zusammenfassung und Schlußbemerkung

Es wurde dargelegt, daß die Lernmatrix, die Karl Steinbuch Anfang des Jahres 1961 vorstellte, in ihren Elementen zwar nicht identisch, aber doch mindestens äquivalent mit dem Perceptron von Rosenblatt ist. Berücksichtigt man, daß die nichtlinearen Elemente im Gegensatz zu den linearen Gewichten sogar zwei freie Parameter haben (Stellenwert und Maximalwert bzw. Steigung) so ist die Lernmatrix für komplexe Aufgaben grundsätzlich sogar anpassungsfähiger und damit leistungsfähiger als das Perceptron. Als System hatte das ursprüngliche Perceptron Schwächen. Minsky und Papert deckten sie auf, und es gelang ihnen, den Beweis zu führen, daß Rosenblatts Perceptron die hochgesteckten Erwartungen nicht erfüllen, sondern nur verhältnismäßig einfache Aufgaben lösen kann. Dies hat die Wissenschaft der künstlichen neuronalen Systeme über Jahrzehnte hin fast zum Erliegen gebracht. Dabei wäre es doch so einfach gewesen, diesem Dilemma zu entgehen, denn die von Karl Steinbuch vorgestellten Systeme hatten die kritisierten Schwächen des Perceptrons nicht. Steinbuch hat nämlich insbesondere mit den geschichteten Strukturen schon ein hochgradig nicht lineares System beschrieben. Sie entsprechen genau den „geschichteten Perceptrons", mit denen heute überwiegend gearbeitet wird und die in der Tat ungleich leistungsfähiger sind als das Einschicht-Perceptron, das Minsky und Papert betrachtet und kritisiert haben, siehe Rumelhart u. a. 1986 [7]. Sogar das Hopfield-Netz, eine Schaltung, die erst im Jahr 1982 in den USA vorgestellt wurde und bei der es sich im Grunde um ein rückgekoppeltes assoziatives bzw. neuronales System handelt, wurde von Steinbuch im Grundsatz schon in seinem Buch „Automat und Mensch" aus dem Jahre 1965 beschrieben [4]. Angesichts dieser Tatsache ist es nicht zu vertreten, daß der Name „Steinbuch" in den diesbezüglichen Lehrbüchern überhaupt nicht vorkommt. Man kann nur hoffen, daß die Gilde der Lehrbuchschreiber (wie im Falle von Konrad Zuse) dieses Versäumnis schließlich doch bemerkt und die offensichtliche Ungerechtigkeit beseitigt. Damit sollte man zuerst in Deutschland anfangen.

Ein letztes Wort noch zur Forschungsförderung in Deutschland. Karl Steinbuchs Arbeiten wurden zunächst von der DFG gefördert. Dies ist lobenswert. Die Gutachter der DFG, so hört man es heute, waren allerdings nach einigen Jahren der Ansicht, die Förderung erheblich zu vermindern, was in der Reaktion des verletzten Forschers nach einer kurzen Zwischenförderung bei der Fraunhofer-Gesellschaft schließlich zur Einstellung aller Arbeiten führte. Rückblickend ist dies ein Unglück für die deutsche Forschungslandschaft gewesen. Leider hat man die grundsätzliche Bedeutung im Ansatz von Karl Steinbuch nicht erkannt. Man kann vielmehr vermuten, daß man sich ohne gründliche Prüfung den Ansichten von Minsky, Papert und deren Anhängern angeschlossen hat, die öffentlich alle Strukturkonzepte in Bausch und Bogen verdammten [25], so daß man dann auch in Deutschland sehr einseitig nur noch eine ganz bestimmte Richtung, die sog. „Künstliche Intelligenz" förderte, die nach damaligem Verständnis eine reine Computerangelegenheit mit symbolischer Wissensdarstellung war. Hier haben die Gutachter der DFG einiges gutzumachen. Nicht so sehr in der Förderung der „neuronalen Netze", die inzwischen die gebührende Zuwendung erfahren haben, aber vielleicht in der Behandlung neu auftauchender exzentrischer Forschungsthemen[1]). Ein Vorschlag wäre, die Gutachter davon zu überzeugen, in Zukunft nur einen bestimmten Anteil von „Mainstream"-Forschung zur Förderung zu empfehlen, gleichzeitig aber nicht die modischen Forschungsthemen zu bevorzugen, sondern ein höheres Risiko einzugehen und mehr als bisher originelle deutsche Forschungen zu berücksichtigen (insbesondere auch aus dem Bereich der ingenieursbestimmten Informationstechnik, die von Gutachtern meist zu Unrecht im Schatten der Hochschul-Informatik gesehen wird). Wie das Beispiel von Steinbuch zeigt, werden sonst leichtfertig große Chancen in der deutschen Forschung vertan.

Man glaube nicht, daß dieses Thema heute nicht mehr aktuell ist. Auch heute werden von der deutschen Forschungsförderung originelle Forschungsthemen kaum in dem Maße unterstützt wie Themen, die international schon in einem gewissen Maße abgesegnet sind. Wollen wir so fortfahren und uns auf diese Weise mutwillig in die Zweitklassigkeit steuern? Um dann nach Jahren oder Jahrzehnten wieder wehmütig solche Aufsätze wie diesen hier über Karl Steinbuch zu schreiben und zu beklagen, was uns in Deutschland beinahe gelungen wäre. Ich meine, daß man die Dinge ändern sollte.

Danksagung:

Zwei geschätzte Kollegen und ehemalige Mitarbeiter von Karl Steinbuch, Prof. Dr.-Ing. Winfried Görke, und Prof. Dr.-Ing. Hans Martin Lipp, beide Uni Karlsruhe, die das gesamte Lernmatrix-Drama fast von Anfang an miterlebt haben und selbst an der Weiterentwicklung der Lernmatrizen beteiligt waren, haben mir wesentliche Hinweise auf historische Details gegeben, wofür ich ihnen herzlich danken möchte. (Herr Görke hat zum Schluß, im Jahre 1967, nach seiner Dissertation noch eine umfassende Dokumentation im Taschenbuch der Nachrichtenverarbeitung erstellt. Herr Lipp verfügt noch über Originaldemonstrationsobjekte der Lernmatrizen.) Es war gewiß damals eine schwierige Situation, angesichts vieler gewichtiger Kritiker gerade auch in Deutschland gegen den Strom zu schwimmen. Glücklicherweise gab es Leute wie Werbos und Rumelhart in den USA, die in aller Stille weiter machen konnten, die die wissenschaftliche Basis verbreiterten, effiziente Lernstrategien wie den Backpropagation-Algorithmus entwickelten und, als das Glück ihnen schließlich in Gestalt der plötzlich verfügbaren kleinen Computer noch half, in vielen Anwendungen durch Computer-Simulationen rasch den praktischen Nutzen solcher neuronaler Systeme nachweisen konnten.

[1]) Bertrand Russel: Jede heutige gängige Meinung war einmal exzentrisch.

Schließlich darf ich auch noch Herrn Prof. Dr. Raul Rojas, der in seinem kürzlich erschienenen hervorragenden Buch „Theorie der neuronalen Netze" auch die historische Entwicklung aus der Sicht der angelsächsischen Literatur umfassend dargestellt hat [6], für die kritische Durchsicht des vorliegenden Aufsatzes und für einige hilfreiche Bemerkungen danken. Er ist einer der wenigen Lehrbuchautoren, der überhaupt etwas von Steinbuch und seiner Lernmatrix zu sagen wußte (siehe in [6] Seite 197) und der, von den obigen Argumenten überzeugt, ihn in Zukunft in seinem Lehrbuch in angemessenerer Weise würdigen will.

Literatur:

[1] Steinbuch, K.: Die Lernmatrix. Kybernetik, 1 (1961) 1, S. 36—45.
[2] Rosenblatt, F.: The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psychological Review, Vol. 65 (1958) S. 386—408.
[3] McCulloch, W.; Pitts, W.: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, Vol. 5 (1943) S. 115—133.
[4] Steinbuch, K.: Automat und Mensch. Berlin: Springer Verlag 1965.
[5] Hilberg, W.: Digitale Speicher I. München: Oldenbourg Verlag 1987.
[6] Rojas, R.: Theorie der neuronalen Netze. Berlin: Springer Verlag 1993.
[7] Rumelhart, D.; Mc Clelland, J.: Parallel Distributed Processing. Cambridge Massachusetts: MIT Press 1986.
[8] Schürmann, J.; Kressel, U.: Mustererkennung mit statistischen Methoden. Vorlesungsskriptum THD, 1992.
[9] Küpfmüller, K.: Informationsverarbeitung durch den Menschen. Nachrichtentechn. Z. 12 (1959) S. 68—74.
[10] Minsky, M.; Papert, S.: Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry. Cambridge, Massachusetts: MIT Press 1969.
[11] Hopfield, I.: Neural Networks and physical systems with emergent collective computational abilities. Proc. Nat. Acad. Sciences, Vol. 79 (1982) S. 2554—2558.
[12] Küpfmüller, K.; Jenik, F.: Über die Nachrichtenverarbeitung in der Nervenzelle. Kybernetik 1 (1961) 1.
[13] Pawlow, I. P.: Conditioned Reflexes. London: Oxford University Press 1927.
[14] Werbos, P.: Beyond Regression. Diss. Harvard University 1974.
[15] Wendt, S.: Entwurf komplexer Schaltwerke. Berlin: Springer Verlag 1974.
[16] Jenik, F.: Electronic Neuron Models. Ergebn. Biol. 25 (1962) S. 206.
[17] Jenik, F.; Hoehne, H.: Über die Impulsverarbeitung eines mathematischen Neuronenmodells. Kybernetik 3 (1966) S. 109.
[18] Rubner, J.: Neuronale Netze. Physik in unserer Zeit, 22 (1991) 6, S. 255—259.
[19] Vey, St.: Objekterkennung in Grauwertbildern. Darmstädter Dissertation, 1993.
[20] Widrow, B.; Hoff, M. E.: Adaptive switching circuits. New York NY: IRE WESCON Convention Record 1960.
[21] Steinbuch, Karl: Informatik: Automatische Informationsverarbeitung. SEG-Nachrichten (1957) 5, S. 171.
[22] Hönerloh, H. J.; Kraft, H.: Technische Verwirklichung der Lernmatrix in Billing, H. (Ed.) Lernende Automaten. München: Oldenbourg Verlag 1961.
[23] Görke, W.; Kazmierczak, H.; Wagner, S. W.: Anwendung der Lernmatrix, in Billing, H. (Ed.) Lernende Automaten. München: Oldenbourg Verlag 1961.
[24] Görke, W.: Im Taschenbuch der Nachrichtenverarbeitung. Ed. K. Steinbuch Kapitel 12.6.2 Die Lernmatrix (dort umfassende Literaturübersicht). Berlin: Springer Verlag 1967.
[25] Persönliche Mitteilung von Prof. Dr.-Ing. H. M. Lipp, Universität Karlsruhe, über die Erfahrungen auf dem Bionics-Symposium 1966 in den USA.
[26] Wassermann, Ph. D.: Neural Computing. Theory and Practice. New York: Van Nostrand 1989.
[27] Steinbuch, K.; Jänicke, W.; Reiner, H.: Elektrischer Zuordner mit Lerncharakter. Deutsche Patent-Auslegeschrift 1179409 vom 23. 09. 1960.
[28] Hopfield, I. I.: Artificial Neural Networks. IEEE Circuits Devices Mag. (1985) 5, S. 3—10.

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hilberg
Technische Hochschule Darmstadt
Fachgebiet Digitaltechnik
Merckstr. 25
D-64283 Darmstadt

(Eingegangen am 13. 10. 1994)

Neues aus Forschung, Industrie und Wirtschaft

VDE-Nachwuchsförderung: Philipp-Reis-Preis 1995 ausgeschrieben

Als Forschungspreis für zukunftsweisende Entwicklungen in der Nachrichtentechnik zeichnet der Philipp-Reis-Preis junge Ingenieure und Wissenschaftler aus. Der mit 20000 DM dotierte Forschungspreis wurde 1986 von dem VDE Verband Deutscher Elektrotechniker, der Deutschen Telekom AG sowie den Städten Gelnhausen und Friedrichsdorf gestiftet und wird jetzt zum fünften Mal ausgeschrieben. Die Auszeichnung wird Ingenieuren oder Naturwissenschaftlern unter 40 Jahren verliehen, die mit ihrer Arbeit eine bedeutende nachrichtentechnische Neuerung in Gang gesetzt haben, die auch Auswirkungen auf die Volkswirtschaft hat oder eine solche Entwicklung erwarten läßt. Der VDE, als größter technisch-wissenschaftlicher Verband der Elektrotechnik/Elektronik und darauf aufbauender Technologien, hat aufgrund der Fachkompetenz in seiner Informationstechnischen Gesellschaft im VDE (ITG) die Federführung bei der Auswahl des Preisträgers.

Bewerbungsschluß für den Philipp-Reis-Preis ist der **3. April 1995.** Vorschläge oder Bewerbungen sind an die ITG-Geschäftsführung, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt, zu richten.

Philipp Reis war der Erfinder des weltweit ersten Telefons. 1862 hatte der in Gelnhausen geborene und in Friedrichsdorf lehrende Tüftler als Erster demonstriert, daß sich Sprache elektrisch übertragen läßt. Generalpostmeister Heinrich Stephan erkannte schon früh die Bedeutung des Telefons und führte es zielstrebig in Deutschland ein. Die Verleihung des Philipp-Reis-Preises findet im Oktober 1995 in Friedrichsdorf statt.