

The background of the cover is a detailed, artistic illustration of a neuron. The neuron's cell body (soma) is a large, textured, light blue sphere with a pinkish-purple glow. From the soma, several long, thin, branching processes (dendrites and an axon) extend outwards, rendered in a translucent, glowing blue. The background is a dark, deep purple, with faint, out-of-focus outlines of other neurons, creating a sense of a neural network.

Neuronale Netze Grundlagen

Mit Beispielprogrammen in Java

Inhaltsverzeichnis

	Prolog	11
	Einleitung	17
1	Neuronale Netze und das Gehirn	21
1.1	Was sind Neuronale Netze?	22
1.2	Das Gehirn als Vorbild	23
1.2.1	Organisation und Physiologie des Gehirns	24
1.2.2	Die biologische Nervenzelle	25
2	Die Simulation des Gehirns	29
2.1	Die ersten Versuche	29
2.2	Die Hebb'sche Formel	33
2.3	Das Perzeptron	34
2.3.1	Die Theorie von Rosenblatt	34
2.3.2	Das Perzeptron auf dem Papier	36
2.3.3	Das Programm zum Perzeptron	38
3	Mustererkennung durch ein Hopfield-Netz	45
3.1	Der Assoziativspeicher	45
3.1.1	Das Hopfield-Netz auf dem Papier	46
3.1.2	Mustererkennung	50
3.1.3	Ein Beispiel für Mustererkennung	52
4	Der bidirektionale Assoziativspeicher	59
4.1	Verteilter Assoziativspeicher	59
4.1.1	Der bidirektionale Assoziativspeicher auf dem Papier	62
4.1.2	Mustererkennung mit dem bidirektionalen Assoziativspeicher	66
4.1.3	Bildererkennung mit dem bidirektionalen Assoziativspeicher	70

5	Das Backpropagation-Netz	79
5.1	Netztopologie	79
5.2	Die Transferfunktion	80
5.3	Die Lernformel	82
5.4	Das Backpropagation-Netz auf dem Papier	85
6	Vorstellung eines Programms zum Ausführen	
	Neuronaler Netze	91
6.1	Allgemeine Erläuterungen des Programms NetAndDecision	91
6.2	Verwalten der Projekte	92
6.3	Die Gewichtsmatrix	96
6.4	Beispiele erfassen	97
6.5	Der Beispiel-Generator	98
6.6	Das Training des Netzes	101
6.7	Die Ausführung des Netzes	103
6.8	Die Lernkurve	103
6.9	Die Grafik	104
7	Beispiele für Neuronale Netze	107
7.1	Ermittlung der Wurfweite eines Steins	107
7.2	Kreditvergabe Entscheidung	117
7.3	Unterstützung der Kaufentscheidung für einen PC	120
8	Regressionsanalyse mit einem Neuronalen Netz	125
8.1	Die Chartanalyse mit einem Neuronalen Netz	125
8.2	Die Regressionsanalyse	129
8.3	Mehrdimensionale Funktionen	133
9	Expertensysteme	137
9.1	Das Erheben von Wissen	138
9.2	Aufbau eines Expertensystems	139
9.2.1	Wissensbasis	140
9.2.2	Darstellungsproblematik von Wissen	140
9.2.3	Regelbasis	141
9.2.4	Datenbasis	142
9.2.5	Regelinterpretier (Inferenzkomponente)	142
9.2.6	Userschnittstelle	143
9.3	Vorstellung eines Programms zum Ausführen von Expertensystemen	143
9.3.1	Verwalten von Projekten	144

9.3.2	Expertensystem Analyse	145
9.3.3	Expertensystem Daten	146
9.3.4	Verwalten von Expertensystemen	147
9.3.5	Verwalten von Attributen.	149
9.3.6	Verwalten von Regeln	152
9.4	Regelbasis zur Auswahl von statistischen Prognoseverfahren	155
9.4.1	Literaturstudium zum Erheben des Expertenwissens.	156
9.4.2	Ausführen des Expertensystems	159
9.5	Regelbasis zur Unterstützung der Kaufentscheidung für einen PC.	161
10	Ein Backpropagation-Netz programmieren.	169
10.1	Erfassung von Passwort-Mustern.	170
10.2	Ein Neuronales Netz zur Erkennung von Passwort-Mustern	175
10.3	Die Programmierung des Neuronalen Netzes	178
10.3.1	Die Programmierung des Hauptprogramms.	179
10.3.2	Der Konstruktor der Klasse »NeuralNetwork«.	180
10.3.3	Das Einlesen und Verarbeiten von Kommandos.	181
10.3.4	Weitere Methoden der Klasse »NeuralNetwork«.	187
10.3.5	Das Einlesen der Beispieldaten	188
10.4	Die Programmierung der Backpropagation-Technologie.	194
10.4.1	Das Ausführen des Neuronalen Netzes	195
10.4.2	Das Training des Neuronalen Netzes	196
10.4.3	Das Ausführen von außen.	200
11	Ausblick	203
A	Anhang.	207
A.1	Die Beispielprogramme	207
A.2	Installation der Beispielprogramme.	208
A.3	Die verwendete Datenbanktechnologie	208
B	Dokumentierter Quelltext der Programme	213
B.1	Das Programm Perzeptron.	213
B.2	Das Programm HopfieldNet.	220
B.3	Das Programm AssociativeMemory.	225
B.4	Das Programm AssociativeMemoryPicture.	230
	Stichwortverzeichnis	237



Einleitung

Neuronale Netze sind im Moment überall im Gespräch. In den Medien wird gezeigt, wie sie Roboter steuern, mit Aktien handeln oder Gesichter erkennen. Man kann sicherlich den Eindruck haben, dass solche Computerprogramme zurzeit vermehrt entwickelt und eingesetzt werden. Aber leider wird im Rahmen der verschiedenen Berichte niemals gezeigt, wie solche Programme funktionieren.

Was sind eigentlich Neuronale Netze und was will die Künstliche-Intelligenz-Forschung damit?

Ich möchte Ihnen in meinem Buch diese Fragen beantworten. Und zwar auf eine einfache Art und Weise. Wir werden zusammen eine Reise durch die Historie Neuroner Netze beginnen und einige frühe Ansätze kennenlernen. Dann beschäftigen wir uns mit einem aktuellen Ansatz, dem sogenannten Backpropagation-Netz.

Bitte haben Sie keine Sorge, dass es allzu mathematisch wird. Um das Buch zu verstehen, ist wirklich nur Schulmathematik erforderlich. Ich erläutere zudem sämtliche Formeln, sodass Sie sie leicht nachvollziehen können.

Ich habe zu den einzelnen Themen Computerprogramme erstellt, mit denen Sie experimentieren können. Die Programme sind fertig entwickelt und können von der Webseite des mitp-Verlags heruntergeladen werden. Wie sie installiert werden, wird in Anhang A erläutert.

Wenn Sie sich für die Programmierung dieser Systeme interessieren, wird dies in Anhang B behandelt. Sie sollen in die Lage versetzt werden, eigene Systeme zu erstellen. Dazu können Sie die im Anhang vorgestellten Programme und Module heranziehen.

In Kapitel 1 werden Neuronale Netze vorgestellt. Es wird auf das biologische Vorbild des Gehirns verwiesen und dieses im Überblick gekennzeichnet.

Kapitel 2 geht auf die Geschichte der Neuronalen Netze ein.

Kapitel 3 und Kapitel 4 beschäftigen sich mit der Mustererkennung bzw. Bilderkennung durch Neuronale Netze. Sie können experimentelle Programme ausführen, um diese Technologie kennenzulernen.

In Kapitel 5 wird eine der wichtigsten Technologien Neuroner Netze, das sog. Backpropagation-Netz vorgestellt.

Kapitel 6 stellt ein Programm vor, mit dem Neuronale Netze (mit der Backpropagation-Technologie) verarbeitet werden können. Dieses Programm befindet sich auch im Download zum Buch.

Verschiedene Neuronale Netze werden in Kapitel 7 vorgestellt. Es handelt sich um ein Neuronales Netz, das einen Steinwurf simuliert, ein Netz, das die Kreditvergabe einer Bank unterstützen kann, sowie ein Neuronales Netz, das zur Unterstützung der Kaufentscheidung eines PC herangezogen werden kann.

In Kapitel 8 wird diskutiert, wie Neuronale Netze im Rahmen der Regressionsanalyse eingesetzt werden können. Dabei wird auch auf die Chartanalyse von Aktien eingegangen. Zudem wird gezeigt, dass Neuronale Netze auch drei- oder mehrdimensionale Funktionen lernen können.

Kapitel 9 beschäftigt sich mit dem Bereich der Expertensysteme. Dabei gehe ich zunächst auf die Theorie ein, beschreibe aber auch, wie solche Systeme aufgebaut sind und wie sie arbeiten. Weiterhin befasse ich mich mit einem Programm, das verschiedene Expertensysteme verwalten und ausführen kann. Dieses Programm ist auch Bestandteil des Downloads zum Buch.

In Kapitel 10 wird ein Programm für ein Neuronales Netz, das grafische Passwörter erkennen kann, beschrieben, vollständig programmiert und erläutert.

Kapitel 11 möchte den Leser ermuntern, selbst Neuronale Netze oder Expertensysteme zu erstellen. Er kann sich dabei auf die Programme stützen, die im Buch erläutert und im Download mitgeliefert werden.

Mein Buch soll Sie gleichzeitig in die Materie der Künstliche-Intelligenz-Forschung einführen und dabei auch Programme vorstellen, die für die jeweiligen Fragestellungen verwendet werden können, sodass neben der Theorie ein besonderes Augenmerk auf Experimente sowie auf die Programmierpraxis gelegt wird.

Für das Verständnis der Programme im Anhang wäre es schön, wenn Sie Java bereits beherrschen. Ich habe die Programme aber so beschrieben, dass sich auch Java-Anfänger in die jeweiligen Konzepte einlesen können.

Ich wünsche Ihnen beim Lesen und Experimentieren viel Freude und hoffe, dass Sie mein Buch zum Anlass nehmen, sich auch praktisch mit Neuronalen Netzen sowie Expertensystemen zu befassen. Es ist sicherlich einer der interessantesten und zukunftsweisenden Aspekte der heutigen Zeit.

Downloads zum Buch

Die zum Buch gehörenden Programme können Sie unter www.mitp.de/607 downloaden. Sie erhalten dann die folgende Software plus Listings:

- Dokumentation, Java-Doc zu den verwendeten Libraries.
- AssociativeMemory, experimentelles Neuronales Netz

- **AssociativeMemoryPicture**, experimentelles Neuronales Netz
- **ExpertAndDecision**, Verarbeitung und Verwaltung von Expertensystemen
- **HopfieldNet**, experimentelles Neuronales Netz
- **NetAndDecision**, Verarbeitung und Verwaltung von Neuronalen Netzen
- **NeuralNetwork**, experimentelles Neuronales Netz
- **Password**, Erfassung von grafischen Passwörtern
- **Perzeptron**, experimentelles Neuronales Netz
- **RockThrow**, Berechnung eines Steinwurfs
- **SystemCoreExLib**, Library der Module zur künstlichen Intelligenz

Diese werden in den zugehörigen Kapiteln vorgestellt und besprochen. In Anhang B »Dokumentierter Quelltext der Programme« werden die nötigen Schritte beschrieben, die Programme auf Ihrem PC zu installieren.

Neuronale Netze und das Gehirn

Neuronale Netze werden allgemein zur Klassifikation im Rahmen von verschiedenen Fragestellungen eingesetzt. Beispielsweise möchte eine Bank ihren Kreditbestand hinsichtlich seiner Ausfallwahrscheinlichkeit bewerten. Jedem Kredit soll dabei ein Prozentsatz zugewiesen werden, der angibt, mit welchem Betrag der Kredit abgeschrieben werden muss, wie viel der Kredit also – umgekehrt betrachtet – tatsächlich wert ist. Dazu kann ein Neuronales Netz herangezogen werden.

Dem Netz werden zunächst Beispiele vorgesetzt, bei welchen Rahmenparametern sich welcher Abschreibungsprozentsatz ergibt. Zum Beispiel, ist der Kreditnehmer arbeitslos oder Beamter? Ist bei dem Kreditnehmer bereits früher ein Kredit ausgefallen oder nicht?

Mit einer Auswahl solcher Beispiele wird das Neuronale Netz trainiert und dabei erlernt es die Kriterien, nach denen abgeschrieben wird. Nach dieser Trainingsphase kann es zur Bewertung von Krediten herangezogen werden. Und dabei ist es gewissermaßen zur Generalisierung fähig. Es kann nämlich auch Kredite bewerten, die so in den Beispielen nicht vorkommen, und das mit einer geringen Fehlerquote. Weiterhin können die Angaben zu einem Kredit teilweise falsch oder unvollständig sein, und das Neuronale Netz arbeitet trotzdem relativ gut.

So könnte eine automatische Kreditnehmerbewertung von Banken im Internet funktionieren. Sie geben auf der Webseite der von Ihnen ausgewählten Bank Ihre Parameter ein. Das können Ihre Adresse, Ihr Geburtsdatum, Ihre familiäre und Ihre erwerbsmäßige Situation sein. Dann klicken Sie auf den SENDEN-Button und das Formular wird zum Server der Bank gesendet. Ein Neuronales Netz bewertet nun Ihre Angaben und entscheidet, ob Sie den erbetenen Kredit erhalten oder nicht.

Neuronale Netze können dort eingesetzt werden, wo es um Entscheidungen geht und wo ein Mensch zu langsam oder zu teuer ist. Der Bank genügt es, dass das Neuronale Netz im Mittel eine gute Entscheidung trifft. Denn auch ein Mensch trifft nicht immer eine gute Entscheidung. Es werden trotz positiver Entscheidungen des Neuronalen Netzes Kredite ausfallen. Aber das kalkuliert die Bank ein, denn dies geschieht nur ausnahmsweise. Wenn statt des Neuronalen Netzes eine ganze Abteilung von Mitarbeitern eingesetzt würde, die Kreditfreigaben durch-

führt, so entstünden dort viel höhere Personalkosten und daher lohnt sich der Einsatz eines Neuronalen Netzes.

Dies war natürlich nur ein Beispiel; ob Banken tatsächlich so vorgehen, bleibt ihr Geheimnis.

1.1 Was sind Neuronale Netze?

Neuronale Netze sind Computerprogramme. Aber woher kommt ihr Name, wieso »neuronal«? Das hat etwas mit der Historie dieser Programme zu tun. Denn ursprünglich wollte man die Funktion von Gehirnzellen nachempfinden. Das Neuronale Netz steht quasi als Modell für Gehirnfunktionen bzw. der Funktionen von Nervenzellen.

Die ersten Versuche waren so zufriedenstellend, dass man diesen Forschungszweig aufgriff und immer weiter verfeinerte. Zunächst wurden in den 1940er Jahren verschiedene Ansätze erarbeitet. Die beiden Mathematiker McCulloch und Pitts schlugen 1943 vor, eine Gehirnzelle als ein »logisches Schwellenelement« zu verstehen, das zwei Zustände haben kann. Weiter verfeinert wurde diese Modellvorstellung durch Hebb 1949. Das erste Computerprogramm war das »Perzeptron« von Rosenblatt, das er 1960 erstellte. Und dann nahm die weitere Entwicklung ihren Lauf. Ich gehe in Kapitel 2 darauf ein.

Neuronale Netze können in einem breiten Umfang eingesetzt werden. Es lassen sich Anwendungen in der Finanzbranche, der Medizin, in der Versicherungsbranche u.v.m. finden. Dabei kann es sich u. a. um diese Themen handeln:

- Bilderkennung bzw. Mustererkennung, das beinhaltet auch das Erkennen von Sprache oder handgeschriebener Schrift
- Finanzanalyse
- Wettervorhersage
- Diagnose in der Medizin
- Unterstützung bei Entscheidungen
- Unterstützung bei Planungsaufgaben
- Unterstützung bei der Qualitätskontrolle

Dabei soll ein Neuronales Netz nicht den herkömmlichen Computer verdrängen. Wenn es um reine Rechenpower oder die Schnelligkeit der Berechnung geht, werden herkömmliche Programme herangezogen. Ein Neuronales Netz spielt seine Stärken im Bereich von verrauschten Daten, fehlerhaften oder unvollständigen Daten oder vagen und widersprüchlichen Angaben aus. Wenn es beispielsweise keinen eindeutigen Algorithmus für die Lösung eines Problems gibt. Die Neuronale-Netz-Technologie wurde erfolgreich in folgenden Bereichen eingesetzt:

- Bei der Kreditvergabe
- Geschriebene Texte erkennen und in ANSI-Buchstaben umwandeln (bei ANSI handelt es sich um ein in Computern verwendetes Alphabet)
- Texte vorlesen
- Gesprochene Texte in ANSI-Buchstaben umwandeln
- Erkennung von Unterschriften
- Erkennung von gestohlenen Kreditkarten (Chase Manhattan Bank)
- Klassifikation von Radarsignalen
- Sprengstoffdetektor am New Yorker Flughafen
- Autonome Steuerung eines Fahrzeugs
- In der Robotertechnologie (siehe dazu auch mein Buch »LEGO und Elektronik«, im mitp-Verlag erschienen)

Bei Neuronalen Netzen handelt es sich zusammenfassend um eine moderne Technologie, die in der Lage ist, die herkömmliche Computertechnologie zu ergänzen und deren Schwächen auszugleichen.

1.2 Das Gehirn als Vorbild



Abb. 1.1: Das Gehirn (Quelle: highwaystarz / fotolia.com)

Zunächst möchte ich mich mit dem Gehirn beschäftigen, was ja das Vorbild von Neuronalen Netzen ist. Ich beschreibe, wie das Gehirn organisiert ist und wie Nervenzellen funktionieren. Denn diese biologischen Tatsachen tragen zum Verständnis von Neuronalen Netzen bei.

Man kann sich dem Gehirn und seinen Funktionen auf verschiedene Weise nähern. Die *Neurologie* erforscht die biologische Funktionsweise des Gehirns sowie der Nervenzellen. Die *Psychologie* erforscht die psychische Funktionsweise des Gehirns. Und die *Künstliche-Intelligenz-Forschung* widmet sich dem Thema, intelligentes Verhalten durch Computer zu simulieren. In den 1970er und 1980er Jahren arbeiteten diese Disziplinen noch unabhängig voneinander. Es zeigte sich jedoch, dass Synergien entstehen, wenn man interdisziplinär zusammenarbeitet, sodass heute Projekte ins Leben gerufen werden, an denen Forscher aus allen drei Disziplinen zusammenarbeiten. Diese Arbeiten werden oft unter dem Sammelbegriff »Neuroinformatik« zusammengefasst.

Zu Anfang versuchte man, die genauen Gehirnstrukturen auf einem Computer abzubilden. Auf der Basis weiterer Forschungsanstrengungen ergaben sich aber Ansätze, die intelligentes Handeln von Computern zum Gegenstand und nicht unbedingt das Gehirngewebe zum Vorbild haben (siehe Kapitel 5 »Das Backpropagation-Netz«).

1.2.1 Organisation und Physiologie des Gehirns

Das Gehirn ist ein Informationen verarbeitendes Organ. Erst im 19. Jahrhundert wurde dies erkannt. Vorher war man der Meinung, das Gehirn hätte eine Drüsensfunktion im Körper. Seine Spezialisierung in verschiedene Bereiche wurde daraufhin untersucht. Oftmals auf der Basis von Verletzungen des Gehirns, die sich eine Person zugezogen hatte.

Das Gehirn besteht aus etwa 80 Milliarden Nervenzellen. Es gliedert sich in einen Hirnstamm, ein Kleinhirn, ein Zwischenhirn und in das Großhirn. Jeder Teil des Gehirns übernimmt spezielle Aufgaben.

Der *Hirnstamm* verarbeitet eingehende Sinneseindrücke und ausgehende motorische Reaktionen. Weiterhin werden hier Reflexe und automatische Körperfunktionen wie beispielsweise die Atmung gesteuert. Er ist von allen Gehirnteilen der entwicklungsgeschichtlich älteste Teil.

Das *Kleinhirn* ist für das Gleichgewicht und die Bewegungskoordination zuständig. Es ist am unbewussten Lernen beteiligt. Bei Vögeln wird hier das Flugvermögen und bei Räubern deren Jagdverhalten verarbeitet.

Das *Zwischenhirn* vermittelt sensorische und motorische Signale in Richtung Großhirn. Es werden körperliche und psychische Lebensvorgänge gesteuert. Selbst wird es hormonell oder auch über das Nervensystem gesteuert und steuert selber auch über das Hormonsystem. Es ist beispielsweise für die Schlafsteuerung, das Schmerzempfinden sowie für die Temperatursteuerung zuständig.

Das *Großhirn* verarbeitet visuelle Informationen, weiterhin werden Audioinformationen wahrgenommen. Es erfolgt auch die Bewegungskontrolle oder die Tastwahr-

nehmung. Das Großhirn ist für das Gedächtnis und die höheren Gehirnfunktionen zuständig.

Aufgebaut werden sämtliche Gehirnteile von Nervenzellen (auch Neuronen genannt).

1.2.2 Die biologische Nervenzelle

Die Nervenzellen sind im Gehirn in unterschiedlicher Art und Weise netzartig verbunden. Die elektrische Aktivierung einer Nervenzelle führt dazu, dass sie dieses Signal an andere Nervenzellen weiterleitet. Dies kann sich in kurzen Zeitabständen (etwa 100-mal pro Sekunde) wiederholen. Damit ist die Signalverarbeitungs-frequenz einer Nervenzelle viel geringer als die eines Computers.

Der Prozessor eines Computers ist z. B. bei einem PC mit etwa 1.500 MHz getaktet. Das sind 1,5 Mrd. Verarbeitungen in der Sekunde. Die große Verarbeitungsleistung unseres Gehirns rührt von seiner parallelen Verarbeitung her. Der Prozessor eines Computers verarbeitet die Informationen sequenziell. Er eilt durch den Hauptspeicher, den man sich als langes Band von Speicherzellen vorstellen kann, und verarbeitet jeden Befehl und jedes Datum nacheinander. Und auch wenn mehrere Prozessoren gleichzeitig eingesetzt werden, arbeitet jeder Prozessor selbst immer noch sequenziell.

Im Gehirn laufen in jeder Sekunde verschiedene Sinneseindrücke ein. Wir sehen, schmecken und fühlen gleichzeitig. Dann werden auch die Reaktionen auf die Sinneseindrücke und die anderen Steuerungen gleichzeitig durchgeführt. Wir können unsere Beine und Arme gleichzeitig bewegen und hören dabei auch nicht auf zu atmen. Dabei wird – im Gegensatz zum Computer – die Trennung zwischen Daten und Algorithmus aufgehoben. Im Netzwerk des Gehirns sind beide Dinge gleichzeitig vorhanden.

Eine Nervenzelle besteht aus den Dendriten, dem Zellkörper und dem Axon. Diese können zu den EDV-Begriffen *Eingabe*, *Verarbeitung* und *Ausgabe* als äquivalent angesehen werden. Die Dendriten sammeln die Informationen in Form von elektrischen Signalen und führen diese dem Zellkörper zu. Dieser »sammelt« diese Signale, bis sie einen Schwellenwert übersteigen, und feuert seinerseits einen elektrischen Impuls entlang seines Axons.

Die Nervenzellen werden untereinander verschaltet, indem die Dendriten der nachfolgenden Zellen mit dem Axon der Vorgängierzelle in Verbindung stehen. Diese Verbindungen werden Synapsen genannt.

In Abbildung 1.2 werden die verschiedenen Teile einer Nervenzelle schematisch gekennzeichnet. Der Zellkörper ist als Oval dargestellt. Rechts verlässt ihn ein langes Axon. Oben, unten und links verlassen ihn netzwerkartig Dendriten, die jeweils an ihrem Ende eine Synapse besitzen. Diese Synapsen befinden sich in

Kontakt mit einem oder mehreren Axonen anderer Nervenzellen. Zwischen Axon und Synapse besteht dabei ein Spalt, der nur wenige Ångström breit ist. Die Reizweiterleitung erfolgt, indem er durch chemische Botenstoffe, wie etwa das Dopamin (diese Substanzen werden auch Neurotransmitter genannt), überwunden wird.

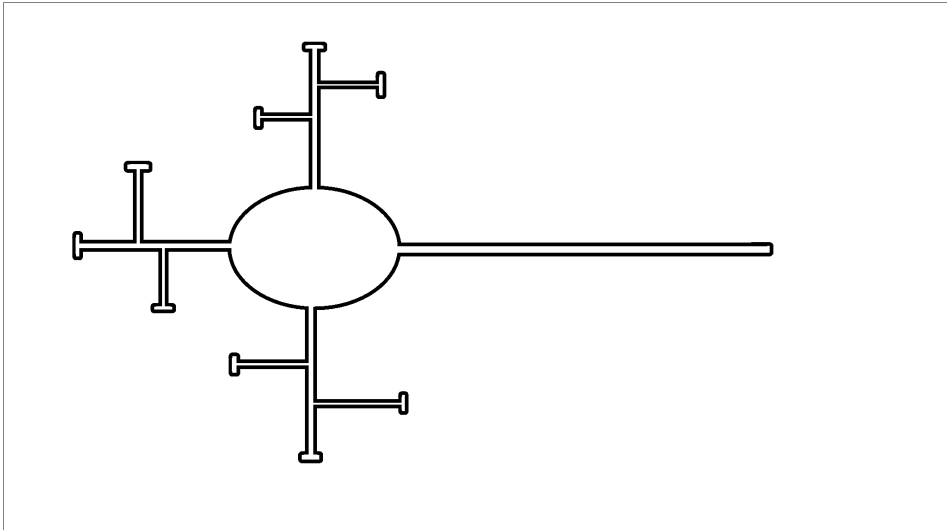


Abb. 1.2: Schematischer Aufbau einer Nervenzelle

Der Dendrit einer Nervenzelle leitet ein elektrisches Signal weiter, das den Zellkörper erreicht. Wenn ein gewisser Schwellenwert durch mehrere Signale überwunden wird, feuert die Zelle ein elektrisches Signal entlang ihres Axons und reizt damit die an ihrem Axon angeschlossenen Synapsen und damit die anderen Nervenzellen, die mit ihm so in Verbindung stehen.

Neben einer signalverstärkenden Wirkung kann eine Synapse auch eine hemmende Wirkung haben. Diese Wirkungen können sich mit der Zeit verändern, sodass aus einer hemmenden Synapse eine verstärkende – und umgekehrt – werden kann.

Man geht heute davon aus, dass die Informationsverarbeitung des gesamten Gehirns durch die Aktivierung aller Nervenzellen dargestellt wird, die sich gegenseitig verstärken oder hemmen. Das Gedächtnis wird durch die Gesamtheit des Synapsen-Netzwerks gebildet.

Dabei kann man einen langsamen und einen schnellen Bereich der Informationsverarbeitung des Gehirns unterscheiden. Dem *schnellen* Bereich der Informationsverarbeitung gehört etwa das Kurzzeitgedächtnis an. Er kann als das jeweilige aktuelle Aktivitätsmuster sämtlicher Nervenzellen aufgefasst werden. Das Netz-

werk, also die Verbindungen der Nervenzellen untereinander, kann dem *langsamen* Bereich (Langzeitgedächtnis) zugeordnet werden. Die Verbindungen dieses Netzwerks ändern sich mit der Zeit, indem neue Verknüpfungen gebildet oder bestehende Verknüpfungen aufgegeben werden. Außerdem können sich verstärkende und hemmende Wirkungen umkehren, wie bereits erwähnt.

Es wurden schon früh Anstrengungen unternommen, die Informationsverarbeitung des Gehirns schematisch darzustellen. Dabei handelte es sich zunächst um mathematische Modelle und später um Computerprogramme. Diese Entwicklung möchte ich im folgenden Kapitel nachzeichnen.

Die Simulation des Gehirns

2.1 Die ersten Versuche

Nachdem die Struktur und die Aufgabe des Gehirns erkannt wurden, versuchte man, sein Verarbeitungsprinzip zu formalisieren. Man stellte sich vor, die Arbeitsweise von Nervenzellen zu simulieren und dabei auch die Verarbeitungsleistung des Gehirns simulieren zu können.

Dies war jedoch ein Trugschluss. Es konnten Modelle über die Arbeitsweise einzelner und einem Netz von Nervenzellen erstellt werden, die auch gut funktionieren. Die Simulation des gesamten Gehirns liegt jedoch noch in weiter Ferne.

In den 1940er-Jahren wurden erste Anstrengungen unternommen, die Arbeitsweise von Nervenzellen zu modellieren. In diesem Zusammenhang schlugen die Mathematiker Warren McCulloch und Walter Pitts 1943 vor, eine Nervenzelle als ein logisches Schwellenwertelement zu betrachten, das zwei Zustände hat, nämlich die binären Zustände eins und null (Nervenzellen werde ich im Folgenden auch als *Elemente* bezeichnen).

Wie bei einer Nervenzelle gibt es mehrere Eingangsleitungen (x_i , das i soll angeben, dass beispielsweise bei drei Eingangsleitungen x dreimal vorkommt: x_1 , x_2 und x_3) und eine Ausgangsleitung (y). Über die Eingangsleitungen werden Impulse in Form von Einsen und Nullen übertragen. Das Schwellenwertelement addiert die Impulse und gibt selbst einen Impuls (1) weiter, wenn diese Summe einen Schwellenwert s überschreitet. Das bedeutet, dass die Ausgangsleitung sich zunächst im Zustand null befindet und, nach dem Überschreiten des Schwellenwerts, in den Zustand eins übergeht. Die erwähnten Eingangsleitungen können sowohl erregende (1) als auch hemmende (-1) Wirkung haben. Dies ist die zugehörige mathematische Formel, die ich danach sofort erläutere:

$$y = \theta \left(\sum_i w_i * x_i - s \right) \quad (1)$$

- Das y steht für den Ausgabewert des Elements.
- θ (der griechische Buchstabe Theta) soll Folgendes berechnen: Wenn das Ergebnis in der Klammer größer oder gleich null ist, ist das Ergebnis der gesamten Berechnung 1, sonst null.

- Σ zeigt an, dass eine Summe gebildet werden soll, nämlich von $w_i * x_i$.
- w_i ist dabei die Synapsen-Stärke (+1 oder -1).
- x_i sind die Eingabeleitungen (1 oder 0).
- s ist der Schwellenwert des Elements.

Das i steht dafür, dass es mehrere Eingabeleitungen zum Element gibt. Wäre $i = 3$, gäbe es x_1 , x_2 und x_3 sowie w_1 , w_2 und w_3 .

Grafisch können Sie sich das, wie in Abbildung 2.1 gezeigt, veranschaulichen.

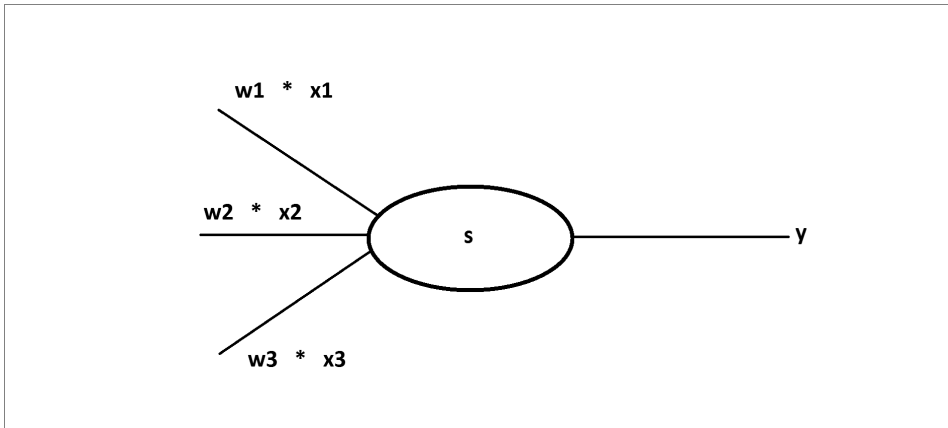


Abb. 2.1: Ein Nervenzellen-Element

Mit der oben genannten Formel werden zunächst die Eingangssignale und die Synapsen-Gewichte multipliziert und danach summiert. Davon wird der Schwellenwert s subtrahiert. Der Körper des Elements steht für Theta. Er gibt nach y eine 1 weiter, wenn die Summe größer oder gleich null ist und eine Null, wenn die Summe kleiner als null ist.

Aus mehreren Elementen kann man beispielsweise das folgende Modell eines Netzwerks entwickeln (siehe Abbildung 2.2).

Wir erkennen an dieser Darstellung sehr schön das in Kapitel 1 behandelte Modell einer Nervenzelle.

McCulloch und Pitts konnten zeigen, dass man mit solchen »Nervenzellen« sämtliche logischen Funktionen nachbauen kann. Insbesondere sind ein *Und-Gatter*, ein *Oder-Gatter* sowie ein *Inverter* möglich, die die Grundlage der anderen logischen Funktionen sind. Der Beitrag beider Mathematiker findet sich noch heute in den Modellen der Neuronalen Netze.

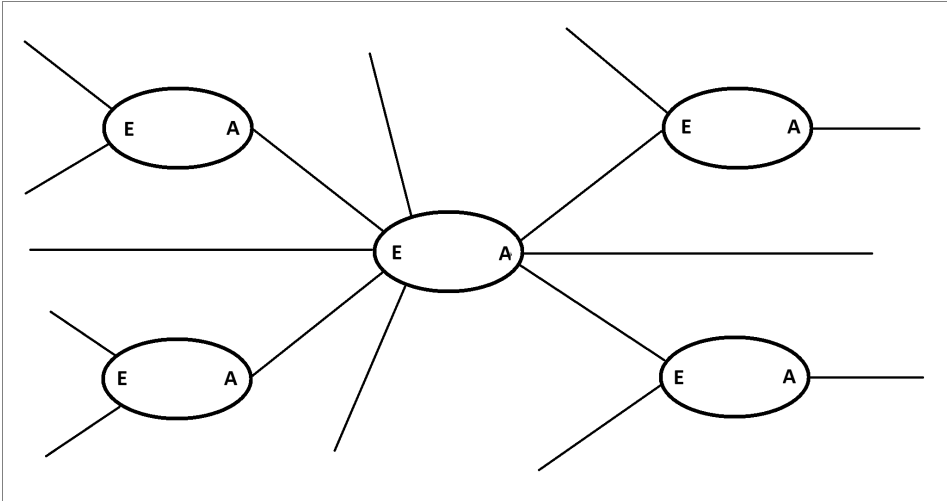


Abb. 2.2: Netzwerk von Elementen (E = Eingabe und A = Ausgabe)

Wir betrachten nun drei Modelle für ein Und- sowie Oder-Gatter und einen Inverter. Solche logischen Elemente verarbeiten Wahrheitswerte, nämlich die Werte *wahr* und *falsch*. Die nachfolgende Tabelle 2.1 zeigt, wie diese Elemente Wahrheitswerte verarbeiten.

Eingang 1	Eingang 2	Ausgang
Wahr	Wahr	Wahr
Wahr	Falsch	Falsch
Falsch	Wahr	Falsch
Falsch	Falsch	Falsch

Tabelle 2.1: Verarbeitung des Und-Gatters

Wenn ein Und-Gatter zwei Wahrheitswerte verarbeitet, dann liegt an seinem Ausgang der Wahrheitswert *wahr* nur an, wenn an beiden Eingängen der Wahrheitswert *wahr* anliegt.

Eingang 1	Eingang 2	Ausgang
Wahr	Wahr	Wahr
Wahr	Falsch	Wahr
Falsch	Wahr	Wahr
Falsch	Falsch	Falsch

Tabelle 2.2: Verarbeitung des Oder-Gatters

Stichwortverzeichnis

A

- Ableitung 84
- Ableitung einer Funktion 82
- Abschreibungsprozentsatz 21
- Adaptives Filtern 155
- Adressierbarer Speicher 59
- Aktie
 - Kursverlauf 125
- Aktienanalyse 125
- Aktivierung
 - Nervenzelle 25
- AssociativeMemory 66, 225
- Assoziation 67
- Assoziativspeicher 45, 59
 - bidirektionaler 60, 62
 - Eigenschaften 59
 - verteilter 60
- Attribut
 - verwalten 149
- Auf null zentriert 81
- Ausfallwahrscheinlichkeit 21
- Ausführen
 - Neuronales Netz 195
 - von außen 200
- Ausgabeschicht 79
- Ausgangsleitung 29, 34
- Axon 25

B

- Backpropagation-Algorithmus 86
- Backpropagation-Netz
 - Training 196
- Backpropagation-Prozess 198
- Backpropagation-Technologie 79, 194
- Backpropagieren 82
- Befragung 138
- Beispieldaten
 - einlesen 188
- Beispiel-Generator 98
- Best-First Search 142
- Bewertungsfunktion 34
- Bias 81
- Bidirektionaler Assoziativspeicher 60, 62
- Bild 45
 - verraushtes 74
- Bildererkennung 70

- Breadth-First Search 142

C

- Chaotisches Verhalten 77
- Chartanalyse 125

D

- Darstellungsform
 - Regeln 141
- Daten
 - unvollständige 178
- Datenbasis 140, 142
- Dendrit 25
- Depth-First Search 142
- Diskreter Wert 94
- Dreidimensionale Funktion 105
- Durchschnittlicher Netzfehler 101

E

- Eingabedaten 139
- Eingabeleitung 34–35
- Eingabeschicht 79
- Eingabevektor 51
- Eingangsleitung 29, 33
- Einlesen
 - Beispieldaten 188
 - Kommandos 181
- Energiefunktion 57, 62
- Epsilon 33
- Ergebnisvektor 49
- Exception-Meldung 179
- Expertensystem 67, 137
 - Aufbau 139
 - bearbeiten 148
 - Lernen 138
 - Projekt 144
 - Stärken und Schwächen 203
- Expertenwissen
 - Literaturstudium 155

F

- Fehlerkurve 84
- Fehlertoleranz
 - Assoziativspeicher 59
- Filtern
 - adaptives 155

Fundamentalanalyse 125
 Funktion
 dreidimensionale 105
 logische 30
 mehrdimensionale 133
 zweidimensionale 105

G

Gedächtnis 26
 Gehirn 23, 29
 Drüsenfunktion 24
 Gehirnstruktur 24
 Gehirnzelle 22
 Generalisierung 21
 Generiere-und-Teste-Algorithmus 142
 Gesamtfehler 84
 Gewicht 82
 Gewichtsmatrix 46, 51, 60, 79, 169
 Gewichtsvektor 36
 Gradientenabstieg 84
 Großhirn 24

H

Halluzination 52, 69
 Heuristik 142
 Hidden-Schicht 79, 82
 Hill Climbing 142
 Hirnstamm 24
 HopfieldNet (Java-Programm) 50, 220
 Hopfield-Netz 45–46, 52

I

Industrie 4.0 204
 Initialattribut 149
 Intelligente Schnittstelle 138
 Intelligenz
 künstliche 12
 Inverter 31–32

K

Klassifikation 21
 Klassifizieren 36
 Kleinhirn 24
 Kommando
 einlesen 181
 verarbeiten 181
 Kommunikationskanal 142
 Kondition
 Regeln 153
 Konstruktor
 Klasse 213
 Kontinuierlicher Wert 94
 Kreditnehmerbewertung 21
 Kreditvergabe (Beispiel) 117

Künstliche-Intelligenz-Forschung 24, 203
 Kursverlauf 125
 Aktien 125
 Kurzzeitspeicher 142

L

Langzeitspeicher 142
 Lernalgorithmus 35, 217
 Lernen
 Expertensystem 138
 Lernformel 62, 82
 Lernfunktion 216
 Lernkurve
 Steinwurf-Projekt 113
 Lernrate 113
 Lernschritt 33, 82, 170, 216
 Literaturrecherche 138
 Literaturstudium
 Expertenwissen 155
 Logische Funktion 30

M

Magnetismus 52
 Maximaler Netzfehler 101
 Mehrdimensionale Funktion 133
 Message-Klasse 216
 Minimaler Netzfehler 101
 Mustererkennung 171

N

Nächster-Nachbar-Algorithmus 142
 Nervenzelle 22, 24
 Aktivierung 25
 Arbeitsweise 29
 NetAndDecision 91
 Beispiele erfassen 97
 Lernkurve 103
 Netz
 fehlertolerant 65
 Netz-Ausführung 235
 Netzfehler 113
 durchschnittlicher 101
 maximaler 101
 minimaler 101
 Netzinput 82
 Netzoutput 82
 Netztopologie 79
 Netzwerk 30
 NeuralNetwork 175, 178
 Konstruktor 180
 Neuroinformatik 24
 Neurologie 24
 Neuronale Netze
 ausführen 195
 Stärken und Schwächen 203

Neuronen-Schicht 169

O

Oder-Gatter 31–32

P

Password

Programm 171

Password

als Muster 170

Password-Muster 176

PC-Kaufentscheidung (Beispiel) 120, 161

Personalkosten

einsparen 22

Perzeptron 22, 34

Muster 43

Phasenübergang 57

Potenzfunktion 130

Praxis 107

Produktionssystem 140

Prognoseverfahren 138

auswählen 155

Projekt 145

Chartanalyse 127

Prozessor 25

Psychologie 24

R

Regel

Darstellungsform 141

Konditionen 153

verwalten 152

Regelbasis 139–141, 155

Regelinterpretierer 140, 142

Regressionsanalyse 129

Reproduktionsschritt 222

Robotik 204

S

SAX-Parser 179, 190

Schnittstelle

intelligente 138

Schriftzeichenerkennung 45

Schwellenwert 29

Schwellenwertelement 29

Sigmoid 80

Signal 33

Signalverarbeitungsfrequenz 25

Speicher

adressierbarer 59

Standardabweichung 101, 197–198

Steinwurf (Beispiel) 107

Steuerstrategie 140

Synapse 25, 30, 33

T

Token 175

Training 214

Backpropagation-Netz 196

Transferfunktion 61, 196

U

Und-Gatter 31

Unvollständige Daten 178

Userschnittstelle 140, 143

V

Vektor 34, 43

Verarbeiten

Kommandos 181

Verborgene Schicht 79

Verhalten

chaotisches 77

Verrauschte Zahl 52

Verrauschtes Bild 74

Verteilter Assoziativspeicher 60

W

Wahrheitswert 31

Wert

diskreter 94

kontinuierlicher 94

Wertetyp 150

Wissen

Darstellungsproblematik 140

erheben 138

überführen 137

Wissensbasis 139–140

X

XML 190

X-Schicht 60, 79

Y

Y-Schicht 60, 79

Z

Zahl

verrauschte 52

Zellkörper 25

Zugriff

Adresse 59

Inhalt 59

Zugriffsgeschwindigkeit

Assoziativspeicher 60

Zweidimensionale Funktion 105

Zwischenhirn 24