

Kapitel 2

Einleitung

(Künstliche) neuronale Netze (engl. *artificial neural networks*) sind informationsverarbeitende Systeme, deren Struktur und Funktionsweise dem Nervensystem und speziell dem Gehirn von Tieren und Menschen nachempfunden sind. Sie bestehen aus einer großen Anzahl einfacher, parallel arbeitender Einheiten, den sogenannten *Neuronen*. Diese Neuronen senden sich Informationen (z.B. über äußere Stimuli) in Form von Aktivierungssignalen über gerichtete Verbindungen zu.

Ein oft synonym zu „neuronales Netz“ verwendeter Begriff ist „konnektionistisches Modell“ (*connectionist model*). Die Forschungsrichtung, die sich dem Studium konnektionistischer Modelle widmet, heißt „Konnektionismus“ (*connectionism*). Auch der Begriff „parallele verteilte Verarbeitung“ (*parallel distributed processing*) wird oft im Zusammenhang mit (künstlichen) neuronalen Netzen genannt.

2.1 Motivation

Mit (künstlichen) neuronalen Netzen beschäftigt man sich aus verschiedenen Gründen: In der (Neuro-)Biologie und (Neuro-)Physiologie, aber auch in der Psychologie interessiert man sich vor allem für ihre Ähnlichkeit zu realen Nervensystemen. (Künstliche) neuronale Netze werden hier als Modelle verwendet, mit denen man durch Simulation die Mechanismen der Nerven- und Gehirnfunktionen aufzuklären versucht. Speziell in der Informatik, aber auch in anderen Ingenieurwissenschaften versucht man bestimmte kognitive Leistungen von Menschen nachzubilden, indem man Funktionselemente des Nervensystems und Gehirns verwendet. In der Physik werden Modelle, die (künstlichen) neuronalen Netzen analog sind, zur Beschreibung bestimmter physikalischer Phänomene eingesetzt. Ein Beispiel sind Modelle des Magnetismus, speziell für sogenannte Spingläser¹.

Aus dieser kurzen Aufzählung sieht man bereits, dass die Untersuchung (künstlicher) neuronaler Netze ein stark interdisziplinäres Forschungsgebiet ist. In diesem Buch vernachlässigen wir jedoch weitgehend die physikalische Verwendung

¹Spingläser sind Legierungen aus einer kleinen Menge eines magnetischen und einer großen Menge eines nicht magnetischen Metalls, in denen die Atome des magnetischen Metalls zufällig im Kristallgitter des nicht magnetischen verteilt sind.

(künstlicher) neuronaler Netze (wenn wir auch zur Erklärung einiger Netzmodelle physikalische Beispiele heranziehen werden) und gehen auf ihre biologischen Grundlagen nur kurz ein (siehe den nächsten Abschnitt). Stattdessen konzentrieren wir uns auf die mathematischen und ingenieurwissenschaftlichen Aspekte, speziell auf die Verwendung (künstlicher) neuronaler Netze in dem Teilbereich der Informatik, der üblicherweise „künstliche Intelligenz“ genannt wird.

Während die Gründe für das Interesse von Biologen an (künstlichen) neuronalen Netzen offensichtlich sind, bedarf es vielleicht einer besonderen Rechtfertigung, warum man sich in der künstlichen Intelligenz mit neuronalen Netzen beschäftigt. Denn das Paradigma der klassischen künstlichen Intelligenz (manchmal auch etwas abwertend GOF AI — “good old-fashioned artificial intelligence” — genannt) beruht auf einer sehr starken Annahme darüber, wie Maschinen intelligentes Verhalten beigebracht werden kann. Diese Annahme besagt, dass die wesentliche Voraussetzung für intelligentes Verhalten die Fähigkeit ist, Symbole und Symbolstrukturen manipulieren zu können, die durch physikalische Strukturen realisiert sind. Ein *Symbol* ist dabei ein Zeichen, das sich auf ein Objekt oder einen Sachverhalt bezieht. Diese Beziehung wird operational interpretiert: Das System kann das bezeichnete Objekt bzw. den bezeichneten Sachverhalt wahrnehmen und/oder manipulieren. Erstmals explizit formuliert wurde diese Hypothese von [Newell und Simon 1976]:

Hypothese über physikalische Symbolsysteme:

Ein physikalisches Symbolsystem (physical-symbol system) hat die notwendigen und hinreichenden Voraussetzungen für allgemeines intelligentes Verhalten.

In der Tat hat sich die klassische künstliche Intelligenz — ausgehend von der obigen Hypothese — auf symbolische Wissensrepräsentationsformen, speziell auf die Aussagen- und Prädikatenlogik, konzentriert. (Künstliche) neuronale Netze sind dagegen keine physikalischen Symbolsysteme, da sie keine *Symbole*, sondern viel elementarere *Signale* verarbeiten, die (einzeln) meist keine Bedeutung haben. (Künstliche) neuronale Netze werden daher oft auch „subsymbolisch“ genannt. Wenn nun aber die Fähigkeit, Symbole zu verarbeiten, notwendig ist, um intelligentes Verhalten hervorzubringen, dann braucht man sich offenbar in der künstlichen Intelligenz nicht mit (künstlichen) neuronalen Netzen zu beschäftigen.

Nun kann zwar die klassische künstliche Intelligenz beachtliche Erfolge vorweisen: Computer können heute viele Arten von Denksportaufgaben lösen und Spiele wie z.B. Schach oder Reversi auf sehr hohem Niveau spielen. Doch sind die Leistungen von Computern bei der Nachbildung von Sinneswahrnehmungen (Sehen, Hören etc.) sehr schlecht im Vergleich zum Menschen — jedenfalls dann, wenn symbolische Repräsentationen verwendet werden: Computer sind hier meist zu langsam, zu unflexibel und zu wenig fehlertolerant. Vermutlich besteht das Problem darin, dass symbolische Darstellungen für das Erkennen von Mustern — eine wesentliche Aufgabe der Wahrnehmung — nicht geeignet sind, da es auf dieser Verarbeitungsebene noch keine angemessenen Symbole gibt. Vielmehr müssen „rohe“ (Mess-)Daten zunächst strukturiert und zusammengefasst werden, ehe symbolische Verfahren überhaupt sinnvoll eingesetzt werden können. Es liegt daher nahe, sich die Mechanismen subsymbolischer Informationsverarbeitung in natürlichen intelligenten Systemen, also Tieren und Menschen, genauer anzusehen und ggf. zur Nachbildung intelligenten Verhaltens auszunutzen.

Weitere Argumente für das Studium neuronaler Netze ergeben sich aus den folgenden Beobachtungen:

- Expertensysteme, die symbolische Repräsentationen verwenden, werden mit zunehmendem Wissen i.A. langsamer, da größere Regelmengen durchsucht werden müssen. Menschliche Experten werden dagegen gewöhnlich schneller. Möglicherweise ist eine nicht symbolische Wissensdarstellung (wie in natürlichen neuronalen Netzen) effizienter.
- Trotz der relativ langen Schaltzeit natürlicher Neuronen (im Millisekundenbereich) laufen wesentliche kognitive Leistungen (z.B. Erkennen von Gegenständen) in Sekundenbruchteilen ab. Bei sequentieller Abarbeitung könnten so nur um etwa 100 Schaltvorgänge ablaufen („100-Schritt-Regel“). Folglich ist eine hohe Parallelität erforderlich, die sich mit neuronalen Netzen leicht, auf anderen Wegen dagegen nur wesentlich schwerer erreichen lässt.
- Es gibt zahlreiche erfolgreiche Anwendungen (künstlicher) neuronaler Netze in Industrie und Finanzwirtschaft.

2.2 Biologische Grundlagen

(Künstliche) neuronale Netze sind, wie bereits gesagt, in ihrer Struktur und Arbeitsweise dem Nervensystem und speziell dem Gehirn von Tieren und Menschen nachempfunden. Zwar haben die Modelle neuronaler Netze, die wir in diesem Buch behandeln, nur wenig mit dem biologischen Vorbild zu tun, da sie zu stark vereinfacht sind, um die Eigenschaften natürlicher neuronaler Netze korrekt wiedergeben zu können. Dennoch gehen wir hier kurz auf natürliche neuronale Netze ein, da sie den Ausgangspunkt für die Erforschung der künstlichen neuronalen Netze bildeten. Die hier gegebene Beschreibung lehnt sich eng an die in [Anderson 1995] gegebene an.

Das Nervensystem von Lebewesen besteht aus dem Gehirn (bei sogenannten „niederen“ Lebewesen oft nur als „Zentralnervensystem“ bezeichnet), den verschiedenen sensorischen Systemen, die Informationen aus den verschiedenen Körperteilen sammeln, und dem motorischen System, das Bewegungen steuert. Zwar findet der größte Teil der Informationsverarbeitung im Gehirn/Zentralnervensystem statt, doch ist manchmal auch die außerhalb des Gehirns durchgeführte (Vor-)Verarbeitung beträchtlich, z.B. in der Retina (der Netzhaut) des Auges.

In Bezug auf die Verarbeitung von Informationen sind die Neuronen die wichtigsten Bestandteile des Nervensystems.² Nach gängigen Schätzungen gibt es in einem menschlichen Gehirn etwa 100 Milliarden (10^{11}) Neuronen, von denen ein ziemlich großer Teil gleichzeitig aktiv ist. Neuronen verarbeiten Informationen im wesentlichen durch Interaktionen miteinander.

Ein *Neuron* ist eine Zelle, die elektrische Aktivität sammelt und weiterleitet. Neuronen gibt es in vielen verschiedenen Formen und Größen. Dennoch kann man ein „prototypisches“ Neuron angeben, dem alle Neuronen mehr oder weniger gleichen (wenn dies auch eine recht starke Vereinfachung ist). Dieser Prototyp ist in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt. Der *Zellkörper* des Neurons, der den *Zellkern*

²Das Nervensystem besteht nicht nur aus Neuronen, nicht einmal zum größten Teil. Neben den Neuronen gibt es im Nervensystem noch verschiedene andere Zellen, z.B. die sogenannten Gliazellen, die eine unterstützende Funktion haben.

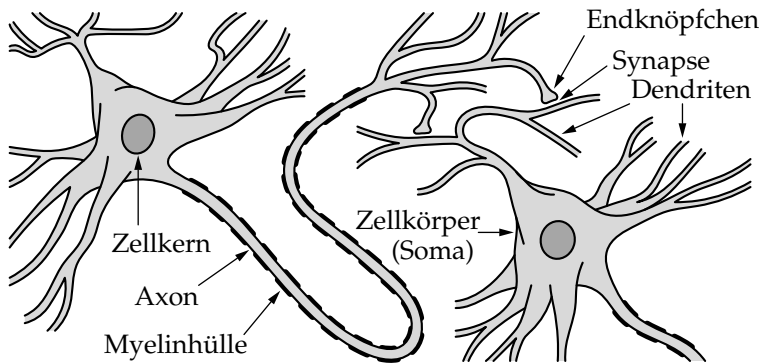


Abbildung 2.1: Prototypischer Aufbau biologischer Neuronen.

enthält, wird auch *Soma* genannt. Er hat gewöhnlich einen Durchmesser von etwa 5 bis 100 μm (Mikrometer, $1\ \mu\text{m} = 10^{-6}\ \text{m}$). Vom Zellkörper gehen eine Reihe von kurzen, stark verästelten Zweigen aus, die man *Dendriten* nennt. Außerdem besitzt er einen langen Fortsatz, der *Axon* heißt. Das Axon kann zwischen wenigen Millimetern und einem Meter lang sein. Dendriten und Axon unterscheiden sich in der Struktur und den Eigenschaften der *Zellmembran*, insbesondere ist das Axon oft von einer *Myelinhülle* umgeben.

Die Axone sind die festen Pfade, auf denen Neuronen miteinander kommunizieren. Das Axon eines Neurons führt zu den Dendriten anderer Neuronen. An seinem Ende ist das Axon stark verästelt und besitzt an den Enden der Verästelungen sogenannte *Endknöpfchen* (engl. *terminal buttons*). Jedes Endknöpfchen berührt fast einen Dendriten oder den Zellkörper eines anderen Neurons. Die Lücke zwischen dem Endknöpfchen und einem Dendriten ist gewöhnlich zwischen 10 und 50 nm (Nanometer; $1\ \text{nm} = 10^{-9}\ \text{m}$) breit. Eine solche Stelle der Beinaheberührung eines Axons und eines Dendriten heißt *Synapse*.

Die typischste Form der Kommunikation zwischen Neuronen ist, dass ein Endknöpfchen des Axons bestimmte Chemikalien, die sogenannten *Neurotransmitter*, freisetzt, die auf die Membran des empfangenden Dendriten einwirken und seine Polarisation (sein elektrisches Potential) ändern. Denn die Innenseite der Zellmembran, die das gesamte Neuron umgibt, ist normalerweise etwa 70 mV (Millivolt; $1\ \text{mV} = 10^{-3}\ \text{V}$) negativer als seine Außenseite, da innerhalb des Neurons die Konzentration negativer Ionen und außerhalb die Konzentration positiver Ionen größer ist. Abhängig von der Art des ausgeschütteten Neurotransmitters kann die Potentialdifferenz auf Seiten des Dendriten erniedrigt oder erhöht werden. Synapsen, die die Potentialdifferenz verringern, heißen *exzitatorisch* (erregend), solche, die sie erhöhen, heißen *inhibitorisch* (hemmend).

In einem erwachsenen Menschen sind meisten die Verbindungen zwischen den Neuronen bereits angelegt und kaum neue werden ausgebildet. Ein durchschnittliches Neuron hat zwischen 1000 und 10000 Verbindungen mit anderen Neuronen. Die Änderung des elektrischen Potentials durch eine einzelne Synapse ist ziemlich klein, aber die einzelnen erregenden und hemmenden Wirkungen können sich summieren (wobei die erregenden Wirkungen positiv und die hemmenden negativ gerechnet werden). Wenn der erregende Nettoeinfluss groß genug ist, kann die Potentialdif-

ferenz im Zellkörper stark abfallen. Ist die Verringerung des elektrischen Potentials groß genug, wird der Axonansatz depolarisiert. Diese Depolarisierung wird durch ein Eindringen positiver Natriumionen in das Zellinnere hervorgerufen. Dadurch wird das Zellinnere vorübergehend (für etwa eine Millisekunde) positiver als seine Außenseite. Anschließend wird durch Austritt von positiven Kaliumionen die Potentialdifferenz wieder aufgebaut. Die ursprüngliche Verteilung der Natrium- und Kaliumionen wird schließlich durch spezielle *Ionenpumpen* in der Zellmembran wiederhergestellt.

Die plötzliche, vorübergehende Änderung des elektrischen Potentials, die *Aktionspotential* heißt, pflanzt sich entlang des Axons fort. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit beträgt je nach den Eigenschaften des Axons zwischen 0.5 und 130 m/s. Insbesondere hängt sie davon ab, wie stark das Axon mit einer Myelinhülle umgeben ist (je stärker die Myelinisierung, desto schneller die Fortpflanzung des Aktionspotentials). Wenn dieser Nervenimpuls das Ende des Axons erreicht, bewirkt er an den Endknöpfchen die Ausschüttung von Neurotransmittern, wodurch das Signal weitergegeben wird.

Zusammengefasst: Änderungen des elektrischen Potentials werden am Zellkörper akkumuliert, und werden, wenn sie einen Schwellenwert erreichen, entlang des Axons weitergegeben. Dieser Nervenimpuls bewirkt, dass Neurotransmitter von den Endknöpfchen ausgeschüttet werden, wodurch eine Änderung des elektrischen Potentials des verbundenen Neurons bewirkt wird. Auch wenn diese Beschreibung stark vereinfacht ist, enthält sie doch das Wesentliche der neuronalen Informationsverarbeitung.

Im Nervensystem des Menschen werden Informationen durch sich ständig ändernde Größen dargestellt, und zwar im wesentlichen durch zwei: Erstens das elektrische Potential der Neuronenmembran und zweitens die Anzahl der Nervenimpulse, die ein Neuron pro Sekunde weiterleitet. Letztere Anzahl heißt auch die *Feuerrate* (engl. *rate of firing*) des Neurons. Man geht davon aus, dass die Anzahl der Impulse wichtiger ist als ihre Form (im Sinne der Änderung des elektrischen Potentials). Es kann 100 und mehr Nervenimpulse je Sekunde geben. Je höher die Feuerrate, desto höher der Einfluss, den das Axon auf die Neuronen hat, mit denen es verbunden ist. In künstlichen neuronalen Netzen wird diese „Frequenzkodierung“ von Informationen jedoch gewöhnlich nicht nachgebildet.

Computational Intelligence

Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze

Kruse, R.; Borgelt, C.; Braune, C.; Klawonn, F.; Moewes, C.; Steinbrecher, M.

2015, X, 515 S. 239 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-10903-5