

Universität Hamburg
Fakultät für Mathematik, Informatik und
Naturwissenschaften
Fachbereich Informatik

Brain Modelling

Gedächtnis bilden und nutzen

Sabrina Schulz
Vivian Öhlenschläger

2. Juni 2015

Emailadresse: 2schulz@informatik.uni-hamburg.de
2oehlens@informatik.uni-hamburg.de
Matrikelnummer: 6440618
6417853
Dozenten: Cornelius Weber
Stefan Wermter

Zusammenfassung

Dieses Paper beschäftigt sich mit dem Bilden und Nutzen von Gedächtnisinhalten. Der Hippocampus speichert Informationen zwischen und bewertet sie, bevor diese an die Hirnrinde und damit an das Gedächtnis weitergeleitet werden. Um den Lernprozess nachzubilden betrachten wir ein künstliches neuronales Netz. Die Boltzmann Maschine, eine Erweiterung des Hopfield Netzes, ist ein stochastischer ungerichteter symmetrischer Graph. Hat sie erst ein Muster gelernt, so ist sie dazu fähig es wieder herzustellen, wenn eine verzerrte Variante davon vorliegt. Hierzu kommunizieren die Neuronen untereinander. Will man sich räumlich orientieren, wird auch das Gedächtnis benötigt. Dazu untersuchen wir die mentale Erkundung von Nagetieren in ihnen bekannten Umgebungen. Beispiele zeigen, dass das Modell geeignet ist um simple Problemstellungen zu lösen, aber noch weit davon entfernt ist der Komplexität des menschlichen Hirns gerecht zu werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Hippocampus	4
1.2	Hirnrinde	5
1.3	Place cells	5
2	Methoden	7
2.1	Mentale Erkundung	7
2.2	Boltzmann Maschine	10
2.2.1	Hopfield Netzwerke	11
2.2.2	Boltzmann Maschine	11
3	Diskussion	13
4	Fazit und Ausblick	15

1 Einleitung

Ohne das Gedächtnis wäre das Leben unvorstellbar: Es formt unser gesamtes Wissen und damit unser Bewusstsein und unsere Persönlichkeit. Unsere gesammelten Erinnerungen und Erfahrungen sind es, die uns bei der Bewältigung des Alltags helfen, es uns ermöglichen aus Fehlern zu lernen und unser Verhalten an die Erfordernisse der Umwelt anzupassen.

Das Gedächtnis ist immer aktiv, so arbeitet es besonders in der Nacht unermüdlich, wenn der Rest des Körpers ruht. In dieser Zeit wird die Konsolidierung von Gedächtnisinhalten verstärkt[Esc13]. Neben der Vertiefung von Assoziationen, was auch im Wachzustand regelmäßig geschieht, findet ebenso eine Förderung der Fähigkeit zur Abstraktion und Problemlösung statt, dies führt dazu, dass viele Problemstellungen nach dem Schlaf besser gelöst werden können als zuvor.

Grund dafür ist das *Replay* zu dem es in der Tiefschlafphase kommt, dabei werden neuronale Muster im Hippocampus reaktiviert, die sich bei dem vorherigen Lernen gebildet haben. Dies geschieht in zwei Phasen, den up-states und den down-states, welche die Hirnrinde mit hohen, langsamen EEG-Wellen auslöst[Bor15]. Mit einem up-state wird dem Hippocampus die erhöhte Erregbarkeit und Bereitschaft Gedächtnisinhalte aufzunehmen von der Hirnrinde signalisiert und so der Replay angestoßen. Zu einer Wiederholung der neuronalen Repräsentationen kann es auch im Wachzustand kommen, jedoch ist es nur im Schlaf möglich die gelernten Inhalte in Richtung Hirnrinde zu transferieren.

Gegenstand vieler aktueller Forschungen und Studien ist es durch gezielte Eingriffe in den Schlaf die Leistung des Gedächtnisses zu verbessern. Dazu gab es bereits einige Ansätze, allerdings steht die Entwicklung dieser Methoden noch in ihren Anfängen, sodass sich bis jetzt noch keine bedeutenden Ergebnisse erzielen ließen.

Vor der Verbesserung des Gedächtnisses stellt sich die Frage, auf welche Weise wir Erfahrungen und Gedächtnisinhalte überhaupt benutzen, um in der Realität Aufgaben zu bewältigen. Deshalb ist eine der zentralen Themen, mit denen wir uns in dieser Ausarbeitung beschäftigen die mentale Erkundung (*mental exploration*). Mit diesem Begriff wird die Fähigkeit beschrieben, sich an bekannte Informationen und Möglichkeiten zu erinnern und diese hinsichtlich einer realen Aufgabe zu filtern und zu bewerten. Dies ermöglicht Menschen und Tieren, basierend auf ihrer Erfahrung, in einer neuen Situation effektive Aktionen durchzuführen. Mentale Erkundung wird bei der Vorstellung verschiedener, möglicher Ergebnisse, bei der Planung von mehreren Aktionen zum Erreichen eines Ziels und bei vielen Aspekten des generellen Denkens genutzt. Es umschreibt also den tatsächlichen Einsatz von den, im Gedächtnis gespeicherten, Informationen, dessen Hintergründe wir in einigen der kommenden Abschnitte, an einem Modell, genauer beleuchten und diskutieren wollen.

Um sich überhaupt an etwas erinnern zu können, muss man es gesehen, gehört oder

anderweitig wahrgenommen haben. Man kann eine Biene erst dann als solche erkennen, wenn man bereits eine Ahnung davon hat, was eine Biene ist. Selbst dann können noch falsche Schlüsse gezogen werden. So macht das Gehirn aus der Biene eine Wespe, weil es anhand der Merkmale zu diesem Schluss gekommen ist. Tatsache aber ist, dass im Kopf bereits ein Bild dieser Tiere existieren muss, um sie zu erkennen. Die Rede ist vom Lernen. Unser zweites Modell beschäftigt sich mit diesem Prozess, ohne den das Gedächtnis vermutlich leer wäre. Dazu betrachten wir einen Lernalgorithmus für die Boltzmann Maschine, ein stochastisches, künstliches neuronales Netz, dass dieses Phänomen abbildet.

1.1 Hippocampus

Der Hippocampus (Plural Hippocampi) ist ein Bestandteil des Gehirns und befindet sich im Temporallappen. Jeder Mensch besitzt zwei Hippocampi.

Eine der wichtigsten Aufgaben des Hippocampus ist seine Rolle in der Gedächtniskonsolidierung, also der Überführung von Gedächtnisinhalten aus dem Kurzzeitgedächtnis in das Langzeitgedächtnis. Es wird davon ausgegangen, dass der Hippocampus in diesem Zusammenhang als Entscheidungsinstanz dient und die Aufgabe übernimmt Erinnerungen zu generieren. Dabei werden Informationen über die Umwelt, welche aus verschiedenen Hirnregionen in den Hippocampus gelangen, gesammelt und bewertet, um anschließend an die Großhirnrinde weitergeleitet zu werden. Dort werden die Informationen miteinander verknüpft und als Gedächtnisinhalte dauerhaft abgelegt.

Bei einer Schädigung oder Entfernung beider Hippocampi können keine neuen Erinnerungen mehr gebildet werden, es tritt eine anterograde Amnesie auf. Dabei ist es weiterhin möglich Wissen abzurufen, welches bereits vor dem Ausfall der Hippocampi vorhanden war, es kann jedoch kein Neugedächtnis gebildet werden. Somit kann ein, von einer anterograden Amnesie betroffener, Mensch sich keine Information länger als einige Sekunden oder Minuten merken. Diese Amnesie betrifft ausschließlich das deklarative Gedächtnis, welches das Wissen über sich selbst und die Umwelt enthält, nicht das motorische Gedächtnis, also allgemeine Bewegungsfertigkeiten.

Der Hippocampus hat außerdem eine große Bedeutung für die Orientierung[[mpg12](#)]. So ist es Menschen mit geschädigten Hippocampi zwar möglich sich im Alltagsleben zu orientieren, sie können jedoch keine Wegbeschreibung geben. So scheint der Hippocampus benötigt zu werden um bei komplexeren Orientierungsaufgaben die richtige Entscheidung zu treffen und um einen Konflikt zu erkennen und zu lösen.

Ebenfalls steht der Hippocampus im Zusammenhang mit Emotionen, zumindest zeigt er Anfälligkeiten gegen Stress. Zusätzlich führen Traumata, sowie Depressionen zu einem reduzierten Volumen der Hippocampusformation.

Der Hippocampus ist zudem einer der wenigen Orte im Gehirn an dem das ganze Leben lang Neurone neu geboren werden, also Neuroneogenese statt findet. Deren genaue Bedeutung ist bis jetzt jedoch noch unklar.

1.2 Hirnrinde

Die Großhirnrinde, auch Cotex genannt, lässt sich in sechs Lappen unterteilen, die sich alle in ihrer Funktion unterscheiden. Im sogenannten Frontallappen liegen neben verschiedenen Arealen auch die motorischen Zentren, welche für die Planung einer Handlung wichtig sind. Außerdem scheinen dort die Persönlichkeitsmerkmale angesiedelt zu sein. Im Occipitallappen, auch Hinterhauptlappen genannt, liegt das Sehzentrum, innen gelegen an den Temporallappen (Schläfenlappen) das Hörzentrum und umgeben von diesen und noch weiteren Lappen sitzt der limbische Lappen. Dieses Areal ist der bekannteste Vertreter für das, was wir als Gedächtnis kennen. Eine klare Abgrenzung ist allerdings schwierig, da die Areale untereinander stark verknüpft sind. Die Großhirnrinde erlangt die stärkste Informationszufuhr vom Thalamus. Diese Informationen umfassen die Wahrnehmungen der verschiedensten Sinnesorgane und werden in unterschiedliche Bereiche geschickt. Da die Aufgaben der Hirnrinde so weit gefächert sind, gibt es noch weitere Modelle um sie einzuteilen, aber die hier beschriebene ist die geläufigste.

Wie bei den meisten Bereichen des Gehirns sind sich Forscher noch nicht sicher, welche Aufgaben der Cortex genau übernimmt. Auffällig ist aber, dass sich in der Entwicklung vom menschlichen Gehirn gerade die Hirnrinde so enorm entwickelt hat. Würde sie fehlen, wäre der Mensch kaum lebensfähig. So würde er beispielsweise einen Großteil seiner Sehkraft verlieren und nur noch Schemen erkennen. Ist das motorische Zentrum verletzt, können sich Mäuse indes Zusammenhänge nicht mehr merken, wie ein Versuch der Max-Planck-Gesellschaft[[mpg13](#)] zeigte und somit bewies, dass das Gedächtnis, anders als lange vermutet, im Cortex liegt. Insgesamt gehen Ärzte davon aus, dass ein größerer Schaden so weitreichend wäre, dass ein Mensch mit zerstörten Cortex im Koma liegen würde denn von diesem hängt vieles ab.



Abbildung 1.1: Unterteilung des Großhirns in Frontallappen(rot), Parietallappen(blau), Occipitallappen(grün) und Temporallappen(gelb)[[PIC](#)]

1.3 Place cells

Bei Place Cells handelt es sich um eine bestimmte Art Neuron, die sich im Hippocampus finden lassen[[KF14](#)]. Sie werden aktiv, wenn ein Tier einen bestimmten Platz in seiner Umwelt betritt, der Place Field genannt wird. Kleine Umgebungen können mit ein oder wenigen Place Fields pro Place Cell sehr detailliert repräsentiert werden, während in

größeren Gebieten viele Place Fields pro Place Cell eine gröbere Darstellung ergeben. Place Cells verändern sich in Abhängigkeit von der momentanen Umgebung des Tieres, um sich dieser anzupassen. Sie ergeben zusammen eine kognitive Karte, eine mentale Repräsentation eines Gebietes. Damit ermöglichen sie uns Navigation und Raumwahrnehmung, also die Kenntnis über den Platz des eigenen Körpers in einem Raum und sein Verhältnis zu anderen Objekten darin.

Der Hippocampus kann mehrere kognitive Karten speichern, die aus verschiedenen Kombinationen von aktiven Place Cells bestehen. Auf Grund ihrer Aufgabe wird die Aktivität von Place Cells stark von dem sensorischen Input beeinflusst.

Im Kontext des Gedächtnisses geben sie Erinnerungen und Erfahrungen ihren räumlichen Zusammenhang und ermöglichen so auch das erneute Auffinden von Punkten in einer bekannten Umgebung.

2 Methoden

Die Modelle, mit welchen wir uns hier beschäftigen, haben zwei unterschiedliche Schwerpunkte. Die Mentale Erkundung bietet die Möglichkeit, auf Basis von erlerntem Wissen und Erfahrungen ein Problem zu lösen. In diesem Abschnitt wird ein neuronales System beschrieben, dass auf dem Hippocampus eines Nagetiers basiert. Das Modell erläutert, wie ein Versuchstier mentale Erkundung nutzt um sich in einer erlernten, räumlichen Umgebung zu orientieren und Pfade zu finden. Die Boltzmann Maschine ist der Versuch den Lernprozess für das Gedächtnis im Cortex mithilfe neuronaler Netze nachzubilden und gelernte Muster zu erkennen.

2.1 Mentale Erkundung

Im Gegensatz zu einer mentalen Zeitreise beschreibt eine mentale Erkundung mehr, als nur eine Wiederholung geschehener Ereignisse vor dem inneren Auge. Mentale Erkundung nutzt bestehendes Wissen und die eigene Erfahrung um neue Lösungsansätze oder -wege zu finden, die eventuell niemals zuvor erlebt wurden. Es ist ein Prozess, bei dem gezielt nach einer passenden Sequenz neuronaler Aktivitäten gesucht wird um ein gewünschtes Ziel zu erreichen. Das, im folgenden erklärte, Modell beschreibt ein Neuronen-Netz, welches mentale Erkundung für räumliche Aufgaben ermöglicht[Hop09]. Dabei bewegt sich das Versuchstier nicht, weil es einen Bewegungsablauf auswendig gelernt hat, sondern auf Grund eines eigenständig entwickelten Wunsches eine Kette von Aktionen auszuführen, die ihm sinnvoll erscheint um an einen bestimmten Ort zu gelangen. Das Modell besteht aus drei Teilen: Der mentalen Suche nach einem geeigneten Bewegungsablauf, die Fähigkeit, diesen Ablauf zu wiederholen und schließlich das physische Ausführen der Bewegungen, getrieben von der mentalen Wiederholung.

In diesem Modell sind mehrere Labyrinth vorhanden, in denen das Versuchstier eingesetzt werden kann. Die Wände und Böden bestehen aus verschiedenen Farben, Mustern und Texturen, die dem Tier als Orientierungshilfe dienen können. Für den Versuch ist es wichtig, dass das Tier ausreichend Zeit zum Erkunden der Umgebung hatte. Anschließend wird es durstig an einem Punkt w kurz mit Wasser versorgt, bevor es an einen anderen Punkt x gesetzt wird. Dieser Punkt kann in dem selben oder einem anderen Labyrinth liegen. Interessant ist nun die Reaktion des Tieres. Ohne die Hilfe von mentaler Erkundung kann es nur durch physikalische Suche in zufällige Richtungen nach dem Wasser suchen. Ist das Tier jedoch in der Lage mentale Erkundung auszuführen sollte es bewegungslos verweilen, bis es, basierend auf seiner Erfahrung, erkannt hat wo es sich befindet. Je nachdem ob es einen möglichen Weg zum Wasser gibt oder ob es sich in einem anderen Labyrinth befindet und Wasser somit nicht zugänglich ist, wird es sich direkt zu Punkt w bewegen oder an seinem Platz bleiben.

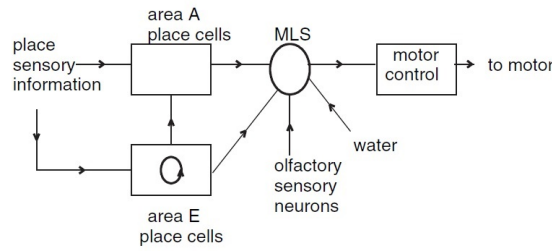


Abbildung 2.1: grobe Darstellung des Modells

Abbildung 2.1 zeigt den groben Aufbau des Modells. Die räumlichen Sensorinformationen gelangen zu den Place Cells von Areal A und E. Hierbei ist Areal E für die mentale Erkundung zuständig, also das Finden eines geeigneten Bewegungsablaufes, welcher einen zielführenden Pfad repräsentiert. Areal A ist dafür zuständig die gewünschte, mentale Route mit der realen Bewegung zu vergleichen. Dies ist notwendig, damit Störungen und Ungenauigkeiten des Systems nicht zum Scheitern führen. MLS steht hier für *motor, learning and selection*, in diesem Teil werden die Informationen von Areal E und A, sowie zusätzliche Sensorinformationen, beispielsweise dem Geruchssinn, verarbeitet. Außerdem wird der Abschnitt von einer Belohnung, in diesem Falle das Wasser, beeinflusst. Ein spezielles Neuron signalisiert dem Tier wenn das Ziel erreicht wurde. Der MLS Abschnitt steuert schließlich die motorischen Bewegungen, die vom Tier ausgeführt werden.

Für die mentale Erkundung ist es notwendig, dass die verschiedenen Umgebungen gleichzeitig in Areal E gespeichert werden können. Um sich ihren Aufbau merken und sie von einander unterscheiden zu können wird eine Methode verwendet, die Spike-Timing-Dependent Plasticity (STDP) genannt wird. Dabei nehmen Neuronen Informationen ausschließlich von denjenigen anderen Neuronen auf, welche stets kurz vor ihnen aktiv sind. Dieses Verhalten beruht auf dem einfachen Prinzip, dass zwei Ereignisse, welche wiederholt nacheinander auftreten meistens in Verbindung zueinander stehen. So stellt das Neuron sicher, dass es nur Informationen aufnimmt, die auch wichtig für es sind und auch nur diese weitergibt. [8]

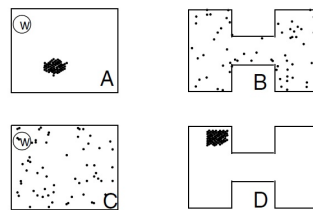


Abbildung 2.2: Place Cell Anordnung

In Abbildung 2.2 wird die Verteilung der Place Cells in zwei verschiedenen Räumen gezeigt. Die Place Cells dienen der Orientierung und Raumwahrnehmung und werden

von den Arealen A und E genutzt. Befindet sich das Versuchstier in dem rechteckigen Raum, dann sorgt das sensorische Input dafür, dass die Place Cells rund um das Tier aktiviert werden (2A). Die so entstehende *Beule* bleibt auch aktiv, wenn es keine neuen Sensorinformationen mehr erhalten werden. Da die Platzierung der Place Cells verschiedener Umgebungen keine Verbindung zueinander haben, ist es wahrscheinlich, dass die in dem rechteckigen Gebiet aktivierten Place Cells in einer neuen Umgebung vollkommen verstreut liegen würden (2B). Erst das sensorische Input sorgt dafür, dass sich erneut eine *Beule* aktiver Place Cells bildet (2D), jedoch handelt es sich hierbei um eine andere Kombination als in der vorherigen Umgebung. Die nun aktivierten Place Cells würden in dem rechteckigen Gebiet ebenfalls verstreut sein (2C).

In diesem Modell sorgt STDP also dafür, dass nur die m nächsten Nachbarn, der jeweiligen Umgebung mit einer Place Cell verbunden sind, um eine bestimmte Kombination zu bilden. Diese Anordnung repräsentiert wiederum mental einen erlernten Ort in einem Gebiet. So steht am Ende jede, in einer *Beule* enthaltene, Kombination Place Cells für einen bestimmten Platz. Wenn das Tier Wasser findet, kann dieses Ereignis mit der momentan aktiven *Beule* in Verbindung gebracht werden und es lernt an welchem Ort sich die Flüssigkeit befindet.

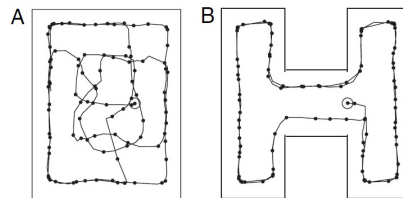


Abbildung 2.3: Bewegung der Beule

Während der mentalen Erkundung bewegt sich die *Beule* nun durch die Umgebung, ohne, dass das Tier in der Realität selbst seinen Platz verlässt. Es werden also mental alle gelernten Kombinationen an Place Cells des momentanen Gebiets durchgegangen, bis jene gefunden wird, die mit dem Wasser verknüpft ist ([Abbildung 2.3](#)). Damit kann das Tier die Frage beantworten, ob es sich in dem Labyrinth befindet, welches Zugang zu dem Wasser bietet oder in einem anderen. Dementsprechend könnte es an seinem Platz verweilen, wenn die Belohnung nicht erreichbar ist oder mit einer physikalischen Suche beginnen. Mentale Erkundung ist jedoch noch zu mehr in der Lage.

Wenn das Versuchstier bei seiner Erkundung einen Weg zu seinem gewünschten Ziel findet, dann kann es diesen verinnerlichen. Dazu wird die Aktivität der Place Cells, also der Weg, welchen die *Beule* genommen hat in Areal E *eingegraben*. Dieser Pfad lässt sich nun jeder Zeit mental in beide Richtungen wiederholen um ihn in einer mentalen Erkundung zu verwenden.

Abschließend ist es noch wichtig zu erwähnen, wie die eigentliche Kontrolle der motorischen Bewegungen erfolgt. Dabei muss gesagt werden, dass sich dieser, ebenfalls auf einem Nagetier basierende, Teil des Modells von einem Säugetier unterscheidet. Er ist jedoch ausreichend um das System zu vervollständigen und einen groben Einblick zu

liefern.

Bei dem, in [Abbildung 2.1](#) gezeigtem, Abschnitt *motor control*, welcher von dem MLS Areal Informationen erhält, handelt es sich um ein einzelnes Neuron. Wird dieses aktiv, wird die Geschwindigkeit umgekehrt und die Bewegungsrichtung des Tiers verändert sich. Erhält das Neuron also beispielsweise von dem MLS Areal die Information, dass die Intensität des Geruchs nach Wasser abnimmt, dann feuert es und in Folge dessen ändert das Tier seine Richtung. Dies wird in [Abbildung 2.4](#) verdeutlicht, indem die Bewegungsbahn ohne (4A) und mit (4B) *motor control* Neuron verglichen wird. in 4B wurde ebenso eine Geruchsquelle als Orientierungshilfe für das Tier verwendet. Noch

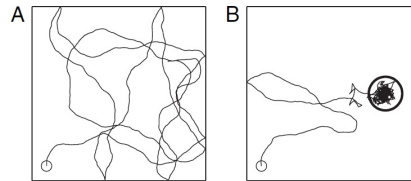


Abbildung 2.4: Bewegungsbahn des Tieres

vor dem *motor control* ist Areal A dafür zuständig die gewünschte, mentale Route mit den realen Bewegungen zu vergleichen. Dies geschieht indem die Aktivität der *Beule* in dem mentalem Weg mit der *Beule* verglichen wird, welche der momentane Standort erzeugt. Liegt die gewünschte Position in der Nähe von der Momentanen, dann zeigen die Neuronen von Areal A eine hohe Aktivität. Ist das Gegenteil der Fall oder befindet das Versuchstier sich in einem anderen Labyrinth, dann ist die Aktivität niedrig.

Wie zu erkennen ist, lernt dieses System keine motorische Bewegungsabfolge auswendig, sondern ist in der Lage selbstständig angemessene Bewegungsabläufe zu wählen und auszuführen. Im Gegensatz zu einer prozeduralen Erinnerung, besteht für das Tier die Möglichkeit sich an besuchte Orte und Wege zu erinnern und diese zu erkunden, ohne sich physikalisch in Bewegung zu setzen.

2.2 Boltzmann Maschine

Neuronale Netze beziehen sich auf den Aufbau des Gehirns. Sie dienen als Analogie für am Computer simulierte künstliche neuronale Netze. Heutzutage werden sie insbesondere zu zweierlei Zwecken genutzt: Zum Einen gibt es die künstlichen neuronalen Netze, die modelliert werden um die Funktionen und Funktionsweise des menschlichen Gehirns nachzubilden bzw. besser verstehen zu können und zum Anderen werden diese Netze mittlerweile auch dazu genutzt um konkrete Problemstellungen zu lösen. Dabei handelt es sich meist um Fragestellungen aus dem Bereich der Statistik, Wirtschaftswissenschaften und Technik.

2.2.1 Hopfield Netzwerke

Hopfield Netzwerke gehören zur Gruppe der künstlichen neuronalen Netze. Bekannt gemacht wurde das Netz von John Hopfield 1982[Hop82]. Das Modell dient zum Verständnis des menschlichen Gedächtnisses und beinhaltet drei Phasen. Die Trainingsphase, in welcher gegebene Muster gespeichert werden. In der zweiten Phase werden Testmuster eingestellt und in der dritten Phase, der Rechenphase, arbeitet das Netz mit dem gegebenen Zustand.

Das Netz ist als vollständiger ungerichteter Graph aufgebaut, wobei die Knoten den Neuronen und die Kanten den Synapsen entsprechen. Ein Neuron kann die Werte -1 und 1 annehmen, dabei gilt der positive Wert als *feuert* und der negative als *feuert nicht*. In Hopfield Netzen sind die Neuronen gleichzeitig Ein- und Ausgabeneuronen. Zwei Knoten i und j sind miteinander verbunden. Jede Kante besitzt dabei ein Kantengewicht w_{ij} . Das Netz ist symmetrisch aufgebaut, was bedeutet, dass das Gewicht w_{ij} gleich w_{ji} ist. Die Neuronen besitzen keine Kante zu sich selbst.

Um ein Neuron zu aktivieren, muss die Summe der gewichteten Eingaben größer sein als ein vorher selbstbestimmter Schwellwert. Dafür definieren wir ein s'_i als neuen Wert des Neurons:

$$s'_i = \begin{cases} +1 & \text{falls } \sum_j w_{ij}s_j \geq \theta_i \\ -1 & \text{sonst} \end{cases}$$

Hierbei gibt s_j den Zustand (-1 oder +1) des Neurons j wieder. θ_i ist der Schwellwert für das Neuron i .

Hopfield Netzwerke besitzen eine Energiefunktion, die für jeden Zustand des Netzes einen Wert besitzt. Diese Funktion dient dazu zu zeigen, dass das System in einen stabilen Zustand gelangt oder in einen Unechten. Die Definition lautet wie folgt:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i,j} w_{ij}s_i s_j + \sum_i \theta_i s_i$$

Diese Energiefunktion nimmt beim Schalten monoton ab und endet immer in einen lokalen Minimum, wenn man asynchron in einer festen Reihenfolge schaltet. Damit gelangt auch das Netz in einen stabilen Zustand. Ein Nachteil des Hopfield Netzes ist der, dass es in lokalen Minima stecken bleiben kann, weswegen wir uns mit einer Erweiterung, der Boltzmann Maschine, beschäftigen haben.

2.2.2 Boltzmann Maschine

Die Boltzmann Maschine ist grob ausgedrückt eine Erweiterung des Hopfield Netzwerkes um ein stochastisches Element. Auch bei ihr gilt, dass kein Neuron eine Verbindung zu sich selbst hat. Ansonsten ist das Gewicht $w_{ij} = w_{ji}$, das Netz ist also ebenfalls symmetrisch. Die Boltzmann Maschine eignet sich gut für *constraint satisfaction* Aufgaben[AHS85]. Wie bei den Hopfield Netzwerken bereits angedeutet können diese in lokalen Minima stecken bleiben. Auch bei der Boltzmann Maschine ist das möglich, die Wahrscheinlichkeit, dass dies eintritt ist aber geringer.

Um dem nämlich zu entgehen wird ein Temperaturkoeffizient T eingeführt, der die Eigenbewegung des Netzes lenkt. Landet das Netz jetzt in einem lokalen Minimum, ist das Bestreben sich daraus zu befreien um die *constraint satisfaction* Aufgaben zu erfüllen und, abhängig von der Aufgabe, das globale Minimum zu finden. Das Netz tendiert zu niedrigeren Energiezuständen, T wird verringert und das Netz kühlt sich ab. So bleibt es irgendwann in einem Minimum. Da das ganze Netz aber stochastisch funktioniert, kann sich der Energiezustand wieder erhöhen. Das ermöglicht es, aus einem lokalen Minimum zu entkommen. Je mehr Zeit verstreicht, desto geringer wird die Temperatur T und mit ihr sinkt auch die Wahrscheinlichkeit von einem Sprung zu einem höheren Energiezustand.

Die Energiefunktion gleicht der vom Hopfield Netz, wird in der Regel aber etwas anders notiert:

$$E = - \sum_{i < j} w_{ij} s_i s_j + \sum_i \theta_i s_i$$

w_{ij} ist die Stärke der Verbindung zwischen den Neuron i und j , s_i der Zustand (0 oder 1) und θ_i der Schwellwert von i .

Anders als beim Hopfield Netz gibt es bei der Boltzmann Maschine eine Menge an Eingabeneuronen (*in*), eine Menge an Ausgabeneuronen (*out*) und eine Menge an versteckten Neuronen (*hidden*). Hopfield Netzwerke besitzen die Eigenschaft, dass die Eingabeneuronen gleich den Ausgabeneuronen $M_{in} = M_{out}$ sind.

In der stark eingeschränkten Lernphase werden nun bei der Boltzmann Maschine Eingangs- und Ausgangsneurone auf die gewünschten Werte gesetzt und festgehalten, während die versteckten Neurone ihren Zustand mittels der stochastischen Netzwerkdyamik ändern. Der ersten Lernphase folgt eine zweite, in der das Netz frei läuft, kein Neuron ist fest. Diese beiden Lernphasen wechseln sich solange ab, bis ein Gleichgewicht im Verhalten des Netzes entstanden ist.

Die Wahrscheinlichkeit, welchen Zustand ein Neuron annimmt ist definiert durch[Sch13]:

$$p_{i=on} = \frac{1}{1 + e^{-\frac{\Delta E_i}{T}}}$$

wobei

$$\Delta E_i = \sum_j w_{ij} s_j - \theta_i$$

ist. Damit wird die Energiedifferenz, die entsteht, wenn ein Neuron schaltet, beschrieben. θ_i ist wie üblich der Schwellenwert von i . Auch diese Definition ähnelt der von den Hopfield Netzen.

3 Diskussion

Im Folgendem, wird ein Beispiel erläutert, dass die Möglichkeiten des (im [Abschnitt 2.1](#)) erklärten Modells zur mentalen Erkundung zeigt. Bei der Versuchsumgebung handelt es sich um ein T-förmiges Labyrinth (Figur 5), welches das Tier zuvor erkundet hat. Dabei hat es gelernt, dass sich an der Stelle w eine Belohnung in Form von Wasser befindet.

Zu Beginn des Versuchs hält sich das Tier an Position x auf, wo es seine mentale Erkundung des Gebietes beginnt. Dabei bewegt sich die *Beule* aktiver Place Cells von seinem Startpunkt x, bis es einen Ort erreicht, der mit der Belohnung verknüpft ist. In diesem Beispiel bewegt sich die *Beule* zuerst nach oben und in den rechten Gang. Dabei gelangt sie in eine Sackgasse, beim Umkehren aktivieren sich Neuronen, die bereits aktiv waren, der Weg gilt als nicht sinnvoll und die Suche beginnt erneut von x.

Anschließend bewegt sich die *Beule* nach unten, springt zurück zu x und erneut nach oben und in den rechten Gang. Erst beim vierten Durchgang wird der linke Weg gewählt und w erreicht. Da die Erkundung erfolgreich war, wird der Weg in Areal E eingepreßt um im Anschluss wiederholt werden zu können.

Nun wird das sensorische Input zu Areal E ausgeschaltet und die *Beule* bewegt sich über den gefundenen Weg von x direkt zu w. Areal A sorgt nun dafür, dass die sich das Tier auch physisch entlang der mentalen Route bewegt und zu w gelangt, ohne Umwege zu machen. Der Vorteil in diesem System gegenüber einer einfachen physischen Erkundung ist es, dass der zurückzulegende Weg verkürzt werden kann und somit der Aufwand, um zum Ziel zu gelangen, stark sinkt.

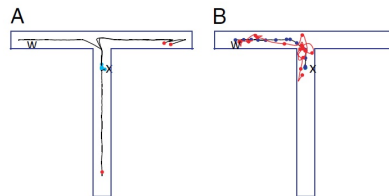


Abbildung 3.1: Mentale Erkundung vs. reale Bewegung

Das Beispiel zeigt sehr gut, wie das Modell bei einfachen räumlichen Aufgaben genutzt werden kann. Auch bei nicht räumlichen Problemen kann das Modell benutzt werden. Generell wird immer eine Abfolge aktiver Neuronen gesucht, bis eine Kombination gefunden ist, die mit dem gewünschten Ziel verknüpft wurde.

Diese geeignete Kette an Aktionen wird dann mental wiederholt und real ausgeführt. In anderen Fällen handelt es sich bei der *Beule* nicht um räumlich nah beieinander liegenden Place Cells, sondern um, von der Situation abhängig, anderweitig zusammengehörige Neuronen. Aber auch dann kann STDP genutzt werden um diese Neuronen

Beule zu finden.

Natürlich ist das Modell stark vereinfacht, insbesondere im Vergleich zu einem Säugetier, dennoch zeigt es wie der Prozess der mentalen Erkundung und Planung im Hirn grob abläuft. Für eine sinnvolle Entscheidungsfindung sind jedoch noch deutlich mehr Dinge nötig, die es zu beachten gilt, als in dem gezeigten System. Nicht nur können im erläuterten Modell Wege mental doppelt erkundet werden, wie in dem Beispiel zu sehen war, es wird auch nicht in jedem Fall der kürzeste Pfad gewählt. Da die einzige Bedingung ist, dass keine Neuronen doppelt aktiviert werden, können zwar Sackgassen vermieden werden, jedoch ist es immernoch möglich große Umwege zu gehen. Die Fähigkeit den günstigsten Pfad zu wählen ist natürlich schwierig zu modellieren, da es sehr von der Intelligenz eines Tieres abhängt. So wissen wir selbst aus eigener Erfahrung, dass auch wir nicht immer abschätzen können, welcher Weg nun der kürzeste oder sinnvollste ist, besonders wenn neben der Länge noch andere Faktoren eine Rolle spielen. Also auch wenn in dem Modell in dieser Richtung sicher Verbesserungsbedarf besteht, kann eine perfekte Entscheidung vermutlich nie gewährleistet werden. Für ein anschauliches Beispiel war es jedoch ausreichend.

Das gleiche gilt für den Prozess in Areal A, welcher als simples Abgleichen von der mental gewünschten Position und der realen Position und daraus resultierende unterschiedlich starke Aktivität dargestellt wurde. Auch hier ist der wirkliche Vorgang sicherlich komplizierter. Das Modell ist beispielsweise nicht in der Lage, die Geschwindigkeit, in welcher sich die *Beule* bei der Wiederholung des gefundenen mentalen Pfades bewegt zu kontrollieren und an die realen Bewegungen anzupassen. Dies ist aber unbedingt notwendig, damit es bei Verzögerungen in der Wirklichkeit nicht dazu kommt, dass die *Beule* dem Tier quasi davonläuft. Auch ansonsten sind zur exakten Steuerung der motorischen Bewegungen vermutlich noch weitere Faktoren notwendig.

4 Fazit und Ausblick

Obwohl das Hopfield Netz dazu dient das menschliche Gehirn abzubilden, so eignet sich die Boltzmann Maschine für andere Bereiche mehr. Sie erlaubt uns zu untersuchen, wie das Lernen bei stochastischen Maschinen abläuft. Auch wenn immer noch nicht erforscht ist, wie genau der Lernprozess zwischen Cortex und Hippocampus abläuft, insbesondere, welche Informationen nicht ins Langzeitgedächtnis gelangen, so ist es doch fraglich, ob das mit der Stochastik zu erklären ist. Besonders gut eignet sich die Boltzmann Maschine (und allgemein Netze ihrer Art) dafür, Optimierungsprobleme zu lösen. Hierbei hängt die Wahrscheinlichkeit das globale Optimum zu finden natürlich stark vom Lernprozess, aber auch vom Problem selbst ab. Aufgrund seiner lokalen Lernregel eignet sich das Netz gut zur Implementation auf Parallelrechnern, denn dieses Modell ist sehr rechenintensiv, dass liegt einerseits am stochastischen Charakter, andererseits lernt die Maschine sehr langsam und muss daher viele Trainingsphasen durchlaufen. So ist die Boltzmann Maschine eben nicht wirklich dafür geeignet das menschliche Lernen nachzuempfinden, insbesondere, da dieser Vorgang selbst auch noch weiter erforscht werden muss.

Das Modell zur mentalen Erkundung gibt einen groben Einblick in das Denken, Entscheiden und Planen des Hirns. Dabei ist das System allerdings stark vereinfacht und von den komplexen Prozessen des Hirns eines Nagetiers oder gar eines Menschen noch weit entfernt. Dennoch können mit diesem simplen Modell bereits einfache Probleme gelöst werden und so die Verbindung zwischen dem psychologischen Prozess des Denkens und den dahinter liegenden neurologischen Abläufen erklären. Weitere Forschungen werden dann vielleicht im späteren Verlauf ermöglichen, dass die Struktur des Modells genauer definiert und weiter an den realen Hirnaufbau angepasst werden kann.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Unterteilung des Großhirns in Frontallappen(rot), Parietallappen(blau), Occipitallappen(grün) und Temporallappen(gelb)[PIC]	5
2.1	grobe Darstellung des Modells	8
2.2	Place Cell Anordnung	8
2.3	Bewegung der Beule	9
2.4	Bewegungsbahn des Tieres	10
3.1	Mentale Erkundung vs. reale Bewegung	13

Literaturverzeichnis

- [AHS85] ACKLEY, David H. ; HINTON, Geoffrey E. ; SEJNOWSKI, Terrence J.: A Learning Algorithm for Boltzmann Machines, 1985 (Cognitive Science 9), S. 147 – 169
- [Bor15] BORN, Prof. Dr. J.: *Schlaf kann ein Neuanfang sein*. Frankfurter Allgemeine Zeitung, S. N2, März 2015
- [Esc13] ESCHENKO, Oxana: *Wie das Gedächtnis im Schlaf aufgebaut wird*. Version: 2013. http://www.mpg.de/6804083/JB_2013. Max-Planck-Gesellschaft
- [Hop82] HOPFIELD, John J.: Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, 1982 (California Institute of Technology)
- [Hop09] HOPFIELD, John J.: Neurodynamics of mental exploration, 2009 (Princeton University)
- [KF14] KIEHN, Ole ; FORSSBERG, Hans: Brain's navigational place and grid cell system, 2014 (Karolinska Institutet)
- [MGS12] MARKRAM, H. ; GERSTNER, W. ; SJÖSTRÖM, P. J.: *Spike-Timing-Dependent Plasticity: A Comprehensive Overview*. Version: 2012. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3395004/>
- [mpg12] *Der Hippocampus als Entscheidungsinstanz*. Version: Juni 2012. http://www.mpg.de/5903149/nmda-rezeptoren_hippocampus. Max-Planck-Gesellschaft
- [mpg13] *Langzeitgedächtnis in der Hirnrinde*. Version: August 2013. http://www.mpg.de/7510120/gedaechtnis_grosshirnrinde. Max-Planck-Gesellschaft
- [PIC] *Unterteilung des Großhirns in Hirnlappen*. <http://www.dr-gumpert.de/fileadmin/bilder/anatomie/gehirn/grosshirn.jpg>
- [Sch13] SCHERER, Andreas: *Neuronale Netze: Grundlagen und Anwendungen*. Springer-Verlag, 2013