Berufsmaturitätsarbeit 2019-2020

Hardware-Neuron

Tendai Rondof / Malik Schneider



Inhaltsverzeichnis

[II. Vorwort 4](#_Toc31623816)

[A. Tendai 4](#_Toc31623817)

[B. Malik 4](#_Toc31623818)

[C. Danksagungen 4](#_Toc31623819)

[III. Abstract 4](#_Toc31623820)

[IV. Einleitung 4](#_Toc31623821)

[V. Modelle eines Neurons 5](#_Toc31623822)

[A. Biologisches Model 6](#_Toc31623823)

[B. Informatisches Model 7](#_Toc31623824)

[C. Anforderungen an unser Modell 8](#_Toc31623825)

[D. Überprüfung des Models 8](#_Toc31623826)

[1. Testmöglichkeiten 10](#_Toc31623827)

[2. Unmöglichkeiten 10](#_Toc31623828)

[E. Unser Modell 12](#_Toc31623829)

[A. Mathematischer Ansatz 12](#_Toc31623830)

[1. Spannung am Kernkondensator 12](#_Toc31623831)

[2. Aktivierung 14](#_Toc31623832)

[3. Fehlerberechnung 14](#_Toc31623833)

[B. Problematik von Theorie und Praxis 15](#_Toc31623834)

[C. Bedingungen/Einschränkungen 15](#_Toc31623835)

[D. Blockschaltbild 16](#_Toc31623836)

[VI. Praxis 17](#_Toc31623837)

[A. Ganzes Neuron 17](#_Toc31623838)

[B. Input 17](#_Toc31623839)

[1. DeltaApply 18](#_Toc31623840)

[C. Core 19](#_Toc31623841)

[D. Activation 19](#_Toc31623842)

[1. Vergleicher OPV 20](#_Toc31623843)

[E. Delta Calc 21](#_Toc31623844)

[VII. Messungen 22](#_Toc31623845)

[A. Blockschaltbild des Versuchsaufbaus 22](#_Toc31623846)

[VIII. Fazit 22](#_Toc31623847)

[IX. Formelverzeichnis 23](#_Toc31623848)

[X. Abbildungsverzeichnis 23](#_Toc31623849)

[XI. Literaturverzeichnis 24](#_Toc31623850)

[XII. Anhang 25](#_Toc31623851)

[A. Layout/Bestückungsplan von EAGLE 25](#_Toc31623852)

[B. Schema von EAGLE 25](#_Toc31623853)

[C. Stückliste 25](#_Toc31623854)

[XIII. Deklaration 25](#_Toc31623855)

# Vorwort

Seit einiger Zeit boomt das Interesse an künstlichen Intelligenzen und neue Ideen, wie sie umgesetzt werden können, sind hochgefragt. Wir erwarten nicht dass wir mit einem Neuron, dass aus einem elektronischen Schaltkreis besteht, das Rad neu erfinden, jedoch gelingt es uns vielleicht einen Weg zu beschreiten der bis jetzt noch niemand bedacht hat.

## Tendai

Ich habe dieses Thema ausgewählt, weil Künstliche Intelligenzen mich seit Jahren interessieren. Durch dieses Projekt kann ich den Wunsch ein Neuron auf Hardwarebasis zu erstellen, endlich erfüllen.

## Malik

Ich habe das Thema gewählt, weil darin zwei grosse Interessensgebiete von mir vereinigt sind: Die Elektronik und die Neurowissenschaft. Vor allem bei letzterem kann ich hiermit mein Wissen erweitern und vertiefen. In der Elektronik kann ich vor allem mein bereits bestehendes Wissen anwenden und trainieren, was meinem späteren Berufsleben ein wenig zugutekommen könnte.

## Danksagungen

Wir möchten unserem Abteilungsleiter, Oliver Schneider, in der MSW danken, welcher uns erlaubte, an den Wochenenden in der MSW an unserer BMA zu arbeiten. Ohne seine Hilfe hätten wir unser Produkt sicher nicht rechtzeitig beenden können.

Daniel Büchler, Abteilungsleiter für die ersten beiden Lehrjahre der Elektroniker in der MSW hat uns freundlicherweise den Fräsbohrplotter zu Verfügung gestellt. Dieser Umstand hat unsere Arbeit ungeheuer beschleunigt. Vor allem für die endgültig letzte Version des Prints war diese Maschine unentbehrlich, weil der bestellte Print aus dem Ausland zu spät angekommen ist.

# Abstract

## Deutsch

In dieser BMA stellen wir, Tendai und Malik, uns die Frage, ob es möglich ist, mit simplen elektronischen Bauteilen eine Schaltung zu entwerfen, die bestimmte elementare Logik erlernen und anschliessend wiedergeben kann. Um dies zu erreichen, nähern wir uns im Hauptteil mittels mathematischen Formeln den Funktionen an, welche diese Schaltung erfüllen muss. Darauffolgend, werden diese Teilfunktionen erklärt und wie unsere Schaltung sie bewältigen soll.

## English

In this BMA we, that’s Malik and Tendai, ask ourselves, wether or not it’s possible, to design an electric circuit

# Einleitung

Das Ziel unserer BMA ist es, den Vorgang des Lernens mit greifbaren, elektronischen Bauteilen zu simulieren. Dieser Aspekt allein hat schon eine gewisse Faszination an sich. Unter Machine-Learning versteht man etwas Komplexes, was sich auf Softwareebene abspielt. Für eine Künstliche Intelligenz sind riesige Mengen an Daten nötig, um ihr etwas beizubringen. Aber wie so vieles, lässt sich auch eine Intelligenz, ob sie jetzt künstlich ist oder nicht, herunterbrechen auf ihre Elementarsten Teile. Beim Menschen sind es die Neuronen, bei der Maschine elektrische Schaltkreise. Unser Produkt ist ein wenig von beidem; Wir simulieren das menschliche Neuron mit einer elektrischen Schaltung.

Aufgrund unseres Lehrberufs, Elektroniker, setzten wir den Fokus auf die Funktionalität und nicht auf Biologische Richtigkeit. Das bedeutet, dass wir versuchten die Funktion elektronisch zu imitieren. Es fielen zwar viele der Biologischen Aspekte eines Neurons weg, jedoch bleibt der Kern des ganzen schlussendlich bestehen: das Lernen.

Um die Printplatte herzustellen, auf welcher wir unsere Schaltung aufgebaut haben, verwendeten wir den MSW-internen Fräsbohrplotter LPKF ProtoMat S63, welcher uns die ersten Prototypen in Höchstgeschwindigkeit zur Verfügung stellen konnte. Da wir zum Schluss unserer BMA noch eine letzte Version aus dem Ausland bestellten, welche sich verspätete, mussten wir leider auch diesen noch selbst ausfräsen lassen.

Die Frage, die wir uns mit dieser BMA beantworten wollen, lautet:

Was ist eine Möglichkeit, ein Neuron (Nervenzelle) mittels Elektronischen teilen zu realisieren und kann damit eine selbstlernende, elektrische Schaltung erstellt werden?

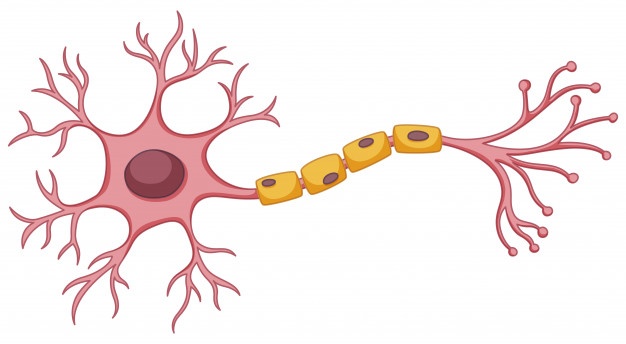
Um diese Frage dreht sich die ganze Arbeit unserer BMA. Darum auch der Name Hardware-Neuron. Unser Endprodukt wird Ausschliesslich aus Elektronischer Hardware bestehen. Mit unserem Endprodukt werden wir uns die Frage also selbst beantworten.

Zu Beginn des Hauptteils wird das Konzept zur Lösung des Problems in all ihren Details und mathematischen Formeln erklärt. Danach wird die Schaltung erklärt, die wir erstellt haben und nach den erläuterten Funktionen arbeitet. Im Anhang finden sie das Design und das Schema des Prints auf EAGLE[[1]](#footnote-1) sowie die Auflistung der Bauteile, welche auf den Print gehören.

# Modelle eines Neurons

In diesem Kapitel Zeigen wir zwei unterschiedliche Modelle eines Neurons in verschiedenen Fachbereichen. Das Kapitel macht verständlich, welche Anforderungen wir an unser Produkt haben und wie wir überprüfen ob diese Anforderungen erfüllt wurden. Dieses Kapitel enthält auch unsere Hypothese, wie diese Anforderungen erfüllt werden können, inklusive den im Voraus ersichtlichen Problemen.

## Biologisches Model



1)

Abb 1: Biologisches Neuron

4)

3)

2)

Das Neuron ist eine Zelle, die auf Signalübertragung spezialisiert ist. Sie kann Reize aufnehmen und ein Signal abgeben. In grosser Zahl und miteinander verbunden, bilden sie das Nervensystem nahezu sämtlicher Säugetiere. Und ihre wohl wichtigste Funktion für uns Menschen ist, dass unser Zentrales Nervensystem (Gehirn) aus ihnen gebaut ist. Nach einer Schätzung etwa neunzig Milliarden[[2]](#footnote-2). Die Signalübertragung geschieht über elektrische Signale, genau genommen über das weiterleiten von Ionensättigungen, und nicht wie bei einer elektrischen Schaltung über einen Elektronenfluss.

In der Abb 1 ist ein solches Neuron Modellgetreu abgebildet. Die Dentriten (Abb 1.1), auch Postsynapse genannt, nehmen die Reize von einem Verhergehenden Neuron oder einer Zelle auf. Der Zellkern/Zellkörper (Abb 1.2) ist das produktions und Speicher Zentrum der Zelle. Dort wird die DNA aufbewahrt, der Stoffwechsel mit der Umgebung durchgefürt und Proteine produziert. Die für uns relevante Funktion dess Zellkerns und des Körpers ist, dass dort die Signale von den Dentriten integrierend[[3]](#footnote-3) verarbeitet werden. Über das Axon (Abb 1.3) wird das integrierte Signal nach dem überschreiten eines Threshholds als ein Impuls übertragen und an die Endknöpfchen (Abb 1.4), auch präsynapse genannt, übergeben. Die Endknöpfchen leiten das Signal mittels Neurotransmitter[[4]](#footnote-4) an ein anderes Neuron weiter. Dieser ganze Durchlauf dauert einige Millisekunden.

Ein Bild, das Objekt enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abb 2: Aktionspotenzial im Axon

Der Impuls, der das Neuron am Axon empfängt, hat in etwa eine Form wie in Abb 1. In der Abbildung wird auch ersichtlich, wie das Potenzial zuerst in einer e-Kurve vom Ruhepotential ansteigt und ab der Schwellspannung exponentiell bis zu einer Maximalspannung ansteigt, bevor die Spannung wieder zusammenbricht und das Neuron bis zum Wiedererlangen des Ruhepotentials Nichts mehr tun kann.

## Informatisches Model

Das künstliche Neuron ist eine Struktur, welche dazu in der Lage ist, eine Funktion zu approximieren. Im Grunde hat diese Struktur im Minimum drei Abschnitte, die jeweils zu einem Abschnitt im Biologischen Neuron korrespondieren. Bisher wurden so viele Variationen der einzelnen Abschnitte entwickelt, die immer auf eine Anwendung optimiert sind, dass man sie hier nicht alle auflisten kann. Im Gegensatz zum biologischen Neuron hat das Künstliche Neuron eine Laufzeit von meist unter einer µs, was mehr als tausend Mal schneller ist.

Ein Bild, das Text enthält.

Automatisch generierte Beschreibung Einfach gesagt, werden die Eingangssignale unterschiedlich gewichtet. Das bedeutet, sie werden mit einem Wert, der zuvor gelernt wurde, multipliziert, dann summiert und zum Schluss durch eine Aktivierungsfunktion ausgegeben. Diese Aktivierungsfunktion ist meistens nicht linear oder eine Schrittfunktion.

Wie beim biologischen Neuron, ist in der Informatik ein einzelnes Neuron ziemlich nutzlos, da sie ausser simple Aufgaben, wie die Funktion verschiedener logischer Operatoren, nichts können. Darum begann man, diese künstlichen Neuronen miteinander zu verknüpfen, wodurch künstliche neuronale Netzwerke entstanden sind. Mit der Hilfe dieser Netzwerke werden bis heute noch Künstliche Intelligenzen konstruiert, die Aufgaben, wie Bild- oder Spracherkennung, übernehmen können.

Abb 3: Chart of Neural Networks (Tch, 2017)

In Abb 3 werden alle bisher standardisierten neuronalen Netzwerke aufgelistet. Wobei die Punkte einem Neuron, und die Linien einer Verbindung zwischen zwei oder mehr Neuronen entsprechen.

An diesem Punkt kommt, eine für unsere BMA, wichtige Eigenschaft von künstlichen Neuronen ins Spiel.

Neuronale Netze werden auf einem Computer simuliert. Das bedeutet, dass der Signalverlauf durch das neuronale Netzwerk sequenziell und in der Taktung des Computers verläuft. Ein Computer kann immer nur eine Aufgabe zu einem Zeitpunkt erledigen und ist durch das, trotz der schnelleren Laufzeit, pro Neuron dem biologischen Neuron, welches alle Neuronen und Signale Simultan und in Echtzeit «Berechnen» kann, weit unterlegen.

## Anforderungen an unser Modell

Es soll eine Schaltung erstellt werden, die Mathematischen Berechnungen eines Neurons imitiert. Dadurch kann eine lernende Schaltung entwickelt werden, die dynamische bzw. lernende Schaltkreise ermöglichen.

Als «lernen» ist zu verstehen, dass die Schaltung berechnet, wie sie welche Eingänge verarbeiten soll. Das passiert, indem der Nutzer am Eingang Daten anlegt und für eine gewisse Trainingsphase, gleichzeitig einen Sollwert für den Ausgang definiert. Mit der Zeit lernt also die Schaltung, wie sie die Eingangsdaten verarbeiten soll und wie sie darauf reagieren soll. Nach der Trainingsphase soll die Schaltung selbständig neue Eingangsdaten interpretieren und einordnen.

Im Idealfall soll unser Neuron so schnell sein, wie das Neuron aus der Informatik, funktionieren und dennoch in Echtzeit und parallel die Berechnungen durchführen. Um die Schaltung einfach zu Skalieren[[5]](#footnote-5) und eine Abhängigkeit von Herstellern zu vermeiden, soll es nur aus einfachen elektronischen Komponenten, wie Transistoren, Widerstände, Dioden und Kondensatoren bestehen. Das bedeutet, dass keine Integrierte Schaltungen, auch ICs genannt, verwendet werden.

## Überprüfung des Models

Damit das Folgende auch gut verstanden werden kann, eine kurze Erklärung zu den Fachbegriffen. In der Elektronik bzw. Digitaltechnik wird mit dem Binären Zahlensystem gearbeitet. Diese Zahlen werden aus Einsen und Nullen gebildet.

Jede 0 und 1 hat einen Zahlenwert, den sie repräsentiert. Im Binärsystem wird die Wertung von rechts nach links pro Stelle verdoppelt. D.h. die erste Ziffer von rechts steht für eins, die zweite für zwei, die dritte für 4 usw.. Steht eine Eins an der Stelle wird die entsprechende Wertung dazuaddiert, steht da eine Null, wird sie weggelassen.

Bsp.:

0001 entspricht im Dezimalsystem der Zahl 1.

0010 entspricht der Zahl 2.

0011 entspricht der Zahl 3.

0100 entspricht der Zahl 4.

Usw.

In der Praxis entspricht die 1 einer Spannung von 5 Volt (auch «High» genannt) und die 0 einer Spannung von 0V (auch «Low» genannt).

Um diese Informationen in der elementarsten Weise zu verarbeiten, werden drei Grundgatter verwendet:

AND:

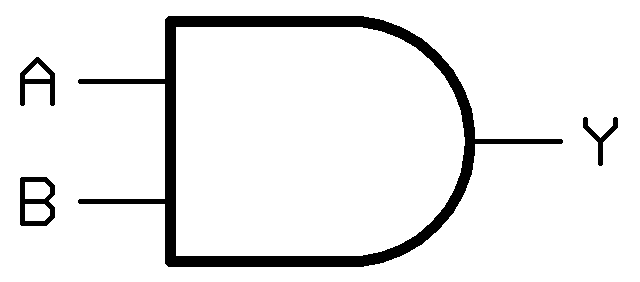


Abb 4: UND Gatter (Stefan506, Wikipedia, 2005)

Tabelle 1: Logiktabelle von einem UND Gatter

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| A | B | Y |
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

Das AND-Gate verknüpft die Eingänge (A & B) so, dass der Ausgang (Y) nur einem «High» entspricht, wenn A und B zur gleichen Zeit auch «High» sind. Jede andere Kombination führt zu einem «Low» am Ausgang.

OR:

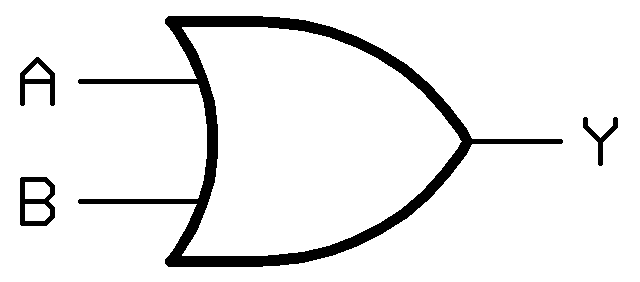


Abb 5: ODER Gatter (Stefan506, Wikipedia, 2005)

Tabelle 2: Logiktabelle von einem ODER Gatter

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| A | B | Y |
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

Das OR-Gate verknüpft die Eingänge (A & B) so, dass der Ausgang (Y) einem «High» entspricht, wenn mindestens einer der beiden Eingänge «High» ist.

NOT:

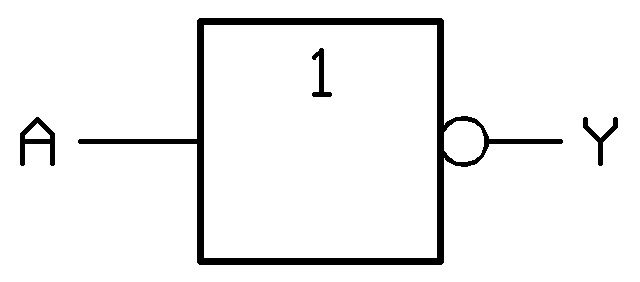


Abb 6: NICHT Gatter (Stefan506, Wikipedia, 2005)

Tabelle 3: Logiktabelle eines NICHT Gatter

|  |  |
| --- | --- |
| A | Y |
| 0 | 1 |
| 1 | 0 |

Das NOT-Gate besitzt nur einen Eingang (A). Das Gatter macht nichts anderes, ausser dem Gegenteil vom Eingang auszugeben.

### Testmöglichkeiten

Um zu überprüfen ob das Neuron auch lernt, soll es die Aufgabe von logischen Gattern (AND, OR) übernehmen bzw. lernen. Um zu überprüfen, ob das Neuron in der Lage ist, zu merken, wenn ein Eingang nicht benötigt wird, wird neben den notwendigen Eingängen auch noch ein überflüssiger Eingang benutzt, der Ignoriert werden soll. Wenn dies zuverlässig funktioniert, kann man davon ausgehen, dass das Neuron in der Lage ist bedingt komplexe[[6]](#footnote-6) Zusammenhänge zu approximieren und wichtige von nicht wichtiger Information zu unterscheiden.

### Unmöglichkeiten

Da das Neuron auf keinen Fall in der Lage ist, Invertierungen (NOT-Gatter) zu imitieren, sind Kombinationen auf der Basis «Wenn ein Eingang **nicht** eingeschaltet ist, dann…» von Anfang an auszuschliessen und unmöglich für das Neuron zu erlernen.

Um es in technischer Sprache zu sagen, das Neuron ist nicht in der Lage XOR, XNOR, NAND, NOR oder NOT Gatter zu erlernen, da nach dem Aufbau des Eingangs (Inputs[[7]](#footnote-7)) immer ein Stromzufluss herrschen muss.

## Unser Modell

Aus den Anforderungen wird klar, dass wir kein Rechenzentrum in getakteter form haben können, sondern eine Schaltung benötigen die fliessend den Ausgang berechnen kann.

Bei dem Paper «Introduction to spiking neural networks» von (Ponulak & Kasinski, 2011) ist uns aufgefallen, dass in der Informatik eine Art von neuronalem Netzwerk existiert, das darauf ausgelegt ist, ein biologisches Neuron so gut wie möglich zu imitieren. In der Informatik konnte sich diese Art von neuronalem Netzwerk bisher noch nicht gut durchsetzen, weil es mehr Rechenleistung als ein Netzwerk einer anderen Art benötigt und schwer zu trainieren ist.

Die Funktion dieser Art Neuron ist identisch zu der Grundstruktur vom Informatischen Model, jedoch ist der Ausgabewert nicht analog, sondern in einer digitalen Form, nach dem «Alles oder Nichts»- oder dem Binärprinzip. Von diesem Prinzip hat diese Art Netzwerk ihren Namen «Spiking Neural Network», was auf Deutsch «Gepulstes Neuronales Netzwerk» bedeutet.

Dieses gepulste Neuronale Netzwerk benötigt vor allem mehr Rechenleistung, weil es die elektronischen Vorgänge in einem Neuron simuliert. Das ist bei einem getaktetem Computer durchaus ein Problem, in der Elektronik jedoch nicht, da dort die Physik das Berechnen der Schaltung übernimmt.

Der Nachteil ist, es ist zeitabhängig. Was bedeutet, dass zeitlich alles gut aufeinander abgestimmt sein muss, was das Trainieren unheimlich erschwert.

## Mathematischer Ansatz

In diesem Abschnitt wird die Berechnung der Schaltung vorgestellt und erklärt. Diese Formeln ermöglichen uns, zu erahnen welche Schaltungsteile wir benötigen und wie wir sie ungefähr verbinden Müssen. Sie zeigen auch auf, welche Funktionen erfüllt werden müssen. Es ist zu beachten, dass mit idealen Bauteilen gerechnet wird und keine Toleranzen von Bauteilen miteinbezogen sind, da diese nicht vorhersehbar sind.

### Spannung am Kernkondensator

Aus diesem Paper «Introduction to spiking neural networks» von (Ponulak & Kasinski, 2011) konnten wir auch die Formel

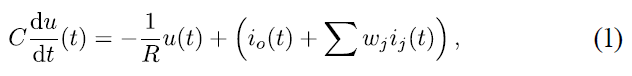


Abb 7: «The Dynamics of the LIF unit» (Ponulak & Kasinski, 2011)

entnehmen, welche die Basis für die mathematische Beschreibung von unserem Modell ist. Aus der Formel von Abb 7: «The Dynamics of the LIF unit» (Ponulak & Kasinski, 2011) kann man herauslesen, dass die Eingänge mit einem Werte multipliziert (Gewichtet) und summiert werden. Hinzu kommt der sogenannte Bias , welcher einen Grundladestrom der konstant ist liefert. Von diesem Zuflussstrom wird ein Abflussstrom abgezogen, welcher von der Spannung zum Zeitpunkt und dem Widerstand abhängig ist. Das ist ein Kondensator der als Integrierendes Element benutzt wird.

Damit wir diese Formel aus Abb 7 in einer Schaltung darstellen können, müssen wir jedoch einige Änderungen vornehmen. Das grösste Problem ist die Gewichtung , welche mit dem Eingangsstrom multipliziert wird. Es ist in der Elektronik nur sehr schwer möglich, Spannungen mit einer Variabel zu Multiplizieren, zudem wird dies durch die Anforderung, dass nur Einfache Bauelemente benutzt werden, nahezu unmöglich für uns.

Unsere Lösung ist, dass wir die Eingangsspannung durch einen variablen Widerstand teilen, was zu einem variablen Strom führt. Ausserdem ist in der Formel aus Abb 7 keine Funktion für das Zurücksetzen der Kondensatorladung miteinbezogen. Da dieses Zurücksetzen für uns eine essentielle Komponente ist, müssen wir sie in unserer Formel mit einberechnen.

|  |
| --- |
|  |

Formel 1: Berechnung der Kernkondensatorspannung

Wenn der Kern-Kondensator eine Gewisse Spannung erreicht, wird ein «Spike» erzeugt, was am Ausgang ausgegeben wird. Dieser «Spike»[[8]](#footnote-8) wird durch eine Aktivierungsfunktion erzeugt. Beim Generieren dieses «Spikes» wird der discharge-Transitor durchgesteuert und der Widerstand geht gegen Ω, was zu einer plötzlichen Entladung des Kernkondensators führt.

### Aktivierung

|  |
| --- |
|  |

Formel 2: Funktion der Ausgabe

: Ausgabe der Schaltung

Sobald der Spike erzeugt wird, wird über den Discharge-Transitor auf 0V gezogen. Was zur Folge hat, dass, wenn der Input dauerhaft auf 5V gestellt ist, sich ein «Spike Train» mit einer festen Frequenz bildet.

### Fehlerberechnung

Damit das Neuron überhaupt etwas lernt, muss eine Art Feedback vom Nutzer oder von der Umgebung kommen. Dafür wird ein Rückgabewert () verwendet. Mit diesem Rückgabewert kann die Gewichtung angepasst werden, indem verändert wird.

|  |
| --- |
|  |

Formel 3: Berechnung des Fehlers

: Kondensator am Gate des Transistors

: Spannung am Eingang

: Widerstand, der die Ent-/Lade Geschwindigkeit des Kondensators angibt (Lern- Schrittgeschwindigkeit)

: Ziel Spike-Train, dass das Neuron erreichen soll

Da und zeitbegrenzte Pulse sind, wird der Kondensator nur ein klein wenig entladen/geladen was den Transistor am jeweiligen Eingang etwas mehr sperren oder leiten lässt. Dadurch können alle Inputgewichte über die Zeit so eingestellt werden, dass dem Ausgang entspricht.

Dies ist natürlich nur bis zu einer gewissen Komplexität möglich. Vor allem, da die Eingangsströme nicht negativ sein können.

## Problematik von Theorie und Praxis

Die grösste Problematik ist, dass das Speichern von analogen Spannungen nur sehr schlecht geht und sehr störungsanfällig ist. Man kann die Schaltung etwas stabilisieren, indem man den Print so gut wie möglich isoliert, um jeglichen Energieverlust über benachbarte Leitungen zu vermeiden.

## Bedingungen/Einschränkungen

Es gibt gewisse Probleme bei der Übersetzung vom Modell in die reale Welt. Zum Einen ist die Praxis nie perfekt, Bauteile haben Toleranzen, Unendlichkeiten gibt es nicht und es ist nicht möglich, Spannungen auf eine einfache Art und Weise zu multiplizieren. Hinzu kommt, dass die gewünschte Formel auch nicht in reiner Form vorkommen wird.

Um die Schaltung kleiner, bzw. in einer sinnvollen Grösse, zu behalten, verzichten wir auf negative Eingangsströme, was die Diversität an lernbaren Funktionen einschränkt, aber keinen Einfluss auf die Funktion der Schaltung hat.

## Blockschaltbild

Output

Schaltung

Verbindungspunkte

- 3 Eingänge

- Sollwert für Output

- Rückrechnung Ein/Aus

Abb 8: Blockartige Übersicht der Schaltung

In der obigen Abbildung (Abb 8) wird die minimalste Grundstruktur des gesamten Systems dargestellt. Die gesamte Peripherie der Schaltung besteht aus sechs Verbindungspunkten. Drei Eingänge, welche die Signale in die Schaltung führen. Einen Eingang für den Sollwert, welcher die Schaltung in der Trainingsphase benötigt, um zu lernen. Der Eingang für die Rückrechnung Ein/Aus ist dafür da, um der Schaltung zu sagen ob sie sich in der Trainingsphase oder im Normalbetrieb befindet. Der Output ist die Ausgabe der Schaltung für einen gegebenen Eingangszustand an den drei Eingängen. Die Ausgabe der Schaltung ist immer vorhanden, auch wenn sie sich in der Trainingsphase befindet.

# Praxis

## Ganzes Neuron



Abb 9: Detailierte Blockartige Übersicht der Schaltung

Der Eingang (Input) verarbeitet die Spannung an den Eingängen bis und summiert sie. Das Zentrum (Core) des Neurons speichert die Werte des Eingangs über die Zeit, bis die Aktivierung (Activation) einsetzt und das Zentrum zurückgesetzt wird.

Der Eingang bei der Fehlerberechnung (DeltaCalcV2) entspricht dem Sollwert zu Trainingszeiten. Der Ausgang bei der Aktivierung wird zu jedem Zeitpunkt beim Training mit dem Sollwert mittels der Fehlerberechnung verarbeitet und dem Eingang angepasst.

Das Neuron lernt somit über Zeit und der Eingang wird bei jedem Fehler um einen konstanten minimalen Schritt-Wert angepasst, um ein Schwingen um den Idealwert zu vermeiden und um das Neuron robuster gegen einzelne Fehler in den Trainingsdaten zu machen.

## Input



Abb 10: Schaltung für die Eingänge

Die Eingangsspannungen bis werden über die, zum Teil leitenden, Transistoren in spezifische Ströme umgewandelt und am Ausgang summiert.

Die Spannungen an den Kondensatoren bestimmen, wie stark die Transistoren durchsteuern. So kann der Widerstand der Transistoren kontrolliert werden. Die Spannung an den Kondensatoren wird über die Fehlerberechnung verändert.

Im mathematischen Sinne entspricht diese Teilschaltung dem Abschnitt

Aus der Formel für die Vorwärtsrechnung.

Der kommt von dem Transistor , der direkt an angeschlossen ist.

### DeltaApply



Abb 11: Schaltung für das Anpassen der Kondensatorspannung

Diese Teilschaltung ist für das Anpassen der Spannungen am Kondensator zuständig. Jeder Eingang besitzt eine solche Teilschaltung. Der Eingang Delta bestimmt, ob der Core-Kondensator geladen oder entladen wird. Enable schaltet mit der Spannung am Transistor den Rückrechnungsvorgang ein oder aus. Der Eingang sagt der Schaltung, ob der Eingang der Gesamtschaltung überhaupt aktiv war.

Diese Teilschaltung ist die Umsetzung des Formelabschnittes , wobei dem Enable Eingang, dem Eingang und dem Delta Eingang entspricht.

## Core



Abb 12: Schaltung des Kerns

Der Core besteht hauptsächlich aus einem Kondensator , welcher über den Eingang aufgeladen wird. Für den Fall, dass keine Signale über die Eingänge bis kommen, sorgt der Widerstand dafür, dass sich der Kondensator langsam entlädt und nach einer gewissen Zeit der Kondensator wieder zurückgesetzt ist.

Die mathematische Darstellung der Teilschaltung ist . Dabei entspricht dem Ausgang der Input-Teilschaltung.

## Activation



Abb 13: Aktivierungsschaltug

Die Aktivierung ist dazu da, um zu bestimmen, ob ein Signal weiter- bzw. ausgegeben werden soll. Wenn die Spannung am Core(Kondensator) über die 2.5V steigt, schaltet der Vergleicher von 0V auf 5V über eine sehr kurze Zeit. Durch diese rapide Änderung gibt es eine Spannungsspitze auf der anderen Seite des Kondensators. Diese Spannungsspitze wird über die zwei folgenden Transistoren verstärkt, damit das Ausgangssignal eine höhere Spannung erreicht und auch mehr Strom liefern kann.

Dieses Ausgangssignal wird über die grüne Leiterbahn zurückgeführt und entlädt das Core (Kondensator) sehr schnell, wodurch dieser wieder unter die 2.5V fällt und der Ausgang des Vergleichers wieder auf 0V schaltet. Danach beginnt der Vorgang von vorne.

Die Diode am Ausgang sorgt dafür, dass wenn der Ausgang des Vergleichers auf 0V ist, der Ausgang der Ganzen Schaltung einen «Tri-state»[[9]](#footnote-9) annimmt (Das bedeutet, dass kein Strom rückwärts in die Schaltung fliessen kann).

### Vergleicher OPV



Abb 14: Primitiver Operations Verstärker

Dies ist eine primitive Schaltung eines Komparators bzw. Vergleichers, welcher in der Elektronik eine essentielle Rolle spielt. Er vergleicht die Eingänge + und – und schaltet den Ausgang auf 5V, wenn die Spannung am + Eingang Grösser ist, als die am – Eingang. Ist das umgekehrte der Fall wird der Ausgang auf 0V gesetzt.

## Delta Calc



Abb 15: Schaltung für die Fehlerberechnung

Die Delta-Calculation (Delta Calc) ist dafür zuständig, zu entscheiden, ob der Ausgang (Ist-Wert) mit dem Soll-Wert übereinstimmt. Der Ausgang «Delta» von diesem Abschnitt gibt an, ob die Kondensatoren an den Eingängen bis geladen, oder entladen werden sollen. Der Ausgang «En» (Kurz für Enable) von diesem Abschnitt sagt, ob dieses Laden oder Entladen der Kondensatoren überhabt durchgeführt werden soll oder nicht.

In Digitaltechnischer Sprache:

Der Ausgang «Delta» entspricht einem Und Gatter mit den Eingängen und . Der Ausgang «En» ist eine XNOR Verknüpfung von und . Sprich wen dann sollen keine Änderungen an den Kondensatoren vorgenommen werden.

# Messungen

Istwert

Abb 15: Blockartige darstellung der Messung

## Messung des Eingangs

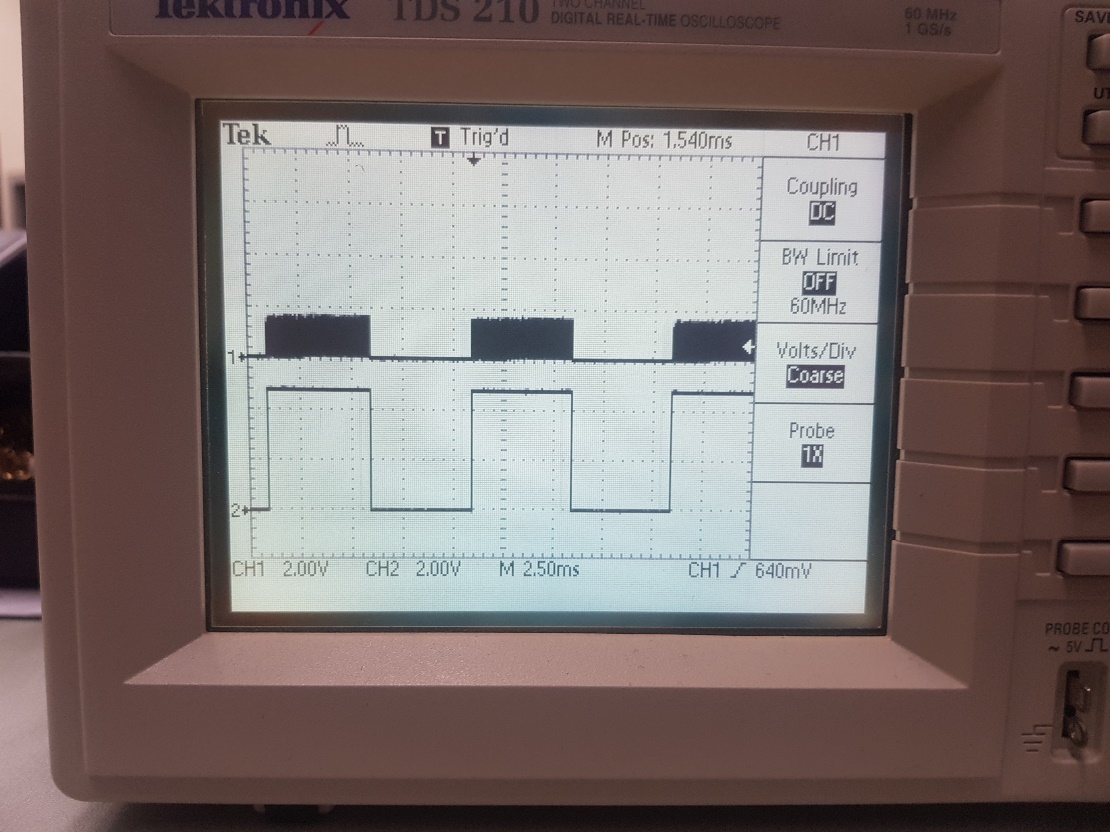
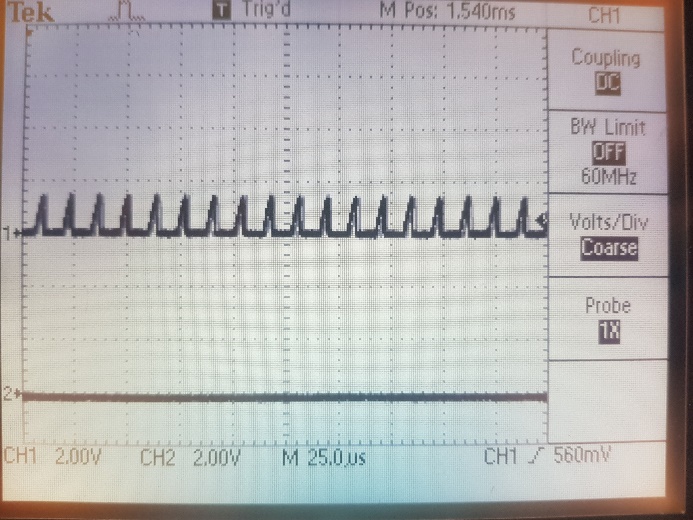
Um zu überprüfen ob der eingangs Strom mit den Transistoren kontrolliert werden kann,

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| U C Eingang (in V) | U C Kern( in V) | I Eingang (in mA) |
| 4,0 | 0,000 | 0,01 |
| 3,9 | 0,000 | 0,01 |
| 3,8 | 0,000 | 0,01 |
| 3,7 | 0,031 | 0,01 |
| 3,6 | 0,154 | 0,03 |
| 3,5 | 0,584 | 0,08 |
| 3,4 | 1,019 | 0,30 |
| 3,3 | 1,948 | 0,93 |
| 3,2 | 3,654 | 2,67 |
| 3,1 | 3,967 | 2,97 |
| 3,0 | 4,911 | 3,82 |
| 2,9 | 4,939 | 3,84 |

## Messung der Aktivierung

# Fazit

Wie sie sehen funktionieren die von uns angestellten theoretischen Berechnungen zur Rückrechnung im Neuron auch in der Praxis.

Wir schafften es schlussendlich nicht, eine funktionierende Endversion unseres Prints zu produzieren. Das hat mehrere Gründe. Zum einen hätten wir uns grundsätzlich mehr Zeit einrechnen müssen für die Phase des Aufbaus und der Inbetriebnahme der Schaltung. Zum anderen ist unsere Printbestellung nicht wie geplant eingetroffen, was für uns massiv mehr Arbeit bedeutete, da wir die Endversion schlussendlich selbst ausfräsen mussten und unsere Fräsmaschine einige Teile der Schaltung sehr Störungsanfällig konstruierte. Obwohl wir das gesamte Wochenende vor der BMA-Abgabe an dem Print gearbeitet haben, reichte die Zeit am Ende doch nicht. Mit einer Woche mehr Zeit, wäre all dies zu vermeiden gewesen. Dann hätten wir nämlich den «qualitativ hochwertigen» Print aus dem Ausland in Betrieb nehmen können.

Dies werden wir aus Interesse trotzdem noch tun. Ausserdem sind wir davon überzeugt, dass man unsere Fragestellung, ob die Realisierung eines Neurons, in Form einer elektrischen Schaltung, möglich ist mit Ja beantworten kann. Grund dafür ist, dass bis auf die Teilschaltung «Delta Calc» alle bereits funktioniert haben, wie sie im Kapitel Messungen gesehen haben. Das «Delta Calc» ist aber im Grunde nur eine Logikschaltung und man kann davon ausgehen, dass diese auch funktionieren würde.

Um unsere Schaltung vor dem Aufbau auszutesten, benutzten wir ein Simulationstool, namens Multisim. Mit diesem konnten wir unsere Theorien und Berechnungen überprüfen. In dieser Simulation funktionierte unsere Schaltung. Ein weiteres Indiz dafür, dass unsere Schaltung theoretisch hätte funktionieren können.

Wie in der Einleitung erwähnt, wollten wir unsere Fragestellung mit einem funktionierenden Endprodukt beantworten. Wegen der fehlenden Zeit, sehen wir aber das nicht funktionieren der Schaltung nicht als repräsentativ an. Wir beantworten stattdessen die Fragestellung, aufgrund der beiden oben genannten Argumente, mit Ja.

Wir haben gelernt, dass es wichtig ist, bei einer Arbeit solchen Ausmasses früher anzufangen Prototypen zu realisieren. Die digitale Version im Simulationstool reicht natürlich nicht. Wir haben leider erst 3 Wochen vor der Abgabe angefangen, am ersten physischen Prototypen zu arbeiten.

Weiterführend könnte man sich die Frage stellen, ob mit mehreren solchen Neuronen ein selbstlernendes Netzwerk erstellt werden kann, indem man Ein und Ausgänge zusammenhängt. Unser Hirn ist ja im Prinzip auch nur ein Haufen zusammengeschalteter Neuronen. Diese Fragen finden ich und Tendai so interessant, dass wir uns vermutlich weiter damit befassen werden, nach der BMA.

# Formelverzeichnis

[Formel 1: Berechnung der Kernkondensatorspannung 13](#_Toc31556525)

[Formel 2: Funktion der Ausgabe 14](#_Toc31556526)

[Formel 3: Berechnung des Fehlers 14](#_Toc31556527)

# Abbildungsverzeichnis

[Abb 1: Biologisches Neuron 6](https://d.docs.live.net/91ae9ccc13efb8fa/GitHub/HardwareNeuron/Dokumentation/Harware%20Neuron%20Produkt%20Doku/schriftlicher%20Kommentar.docx#_Toc31556528)

[Abb 2: Aktionspotenzial im Axon 7](#_Toc31556529)

[Abb 3: Chart of Neural Networks (Tch, 2017) 7](https://d.docs.live.net/91ae9ccc13efb8fa/GitHub/HardwareNeuron/Dokumentation/Harware%20Neuron%20Produkt%20Doku/schriftlicher%20Kommentar.docx#_Toc31556530)

[Abb 4: UND Gatter (Stefan506, Wikipedia, 2005) 9](#_Toc31556531)

[Abb 5: ODER Gatter (Stefan506, Wikipedia, 2005) 10](#_Toc31556532)

[Abb 6: NICHT Gatter (Stefan506, Wikipedia, 2005) 10](#_Toc31556533)

[Abb 7: «The Dynamics of the LIF unit» (Ponulak & Kasinski, 2011) 12](#_Toc31556534)

[Abb 8: Blockartige Übersicht der Schaltung 16](#_Toc31556535)

[Abb 9: Detailierte Blockartige Übersicht der Schaltung 17](#_Toc31556536)

[Abb 10: Schaltung für die Eingänge 17](#_Toc31556537)

[Abb 11: Schaltung für das Anpassen der Kondensatorspannung 18](#_Toc31556538)

[Abb 12: Schaltung des Kerns 19](#_Toc31556539)

[Abb 13: Aktivierungsschaltug 19](#_Toc31556540)

[Abb 14: Primitiver Operations Verstärker 20](#_Toc31556541)

[Abb 15: Schaltung für die Fehlerberechnung 21](#_Toc31556542)

[Abb 15: Blockartige darstellung der Messung 22](https://d.docs.live.net/91ae9ccc13efb8fa/GitHub/HardwareNeuron/Dokumentation/Harware%20Neuron%20Produkt%20Doku/schriftlicher%20Kommentar.docx#_Toc31556543)

# Literaturverzeichnis

Ponulak, F., & Kasinski, A. (1. Januar 2011). Von https://www.ane.pl/cookie?page=linkout.php?pii=7146 abgerufen

Stefan506. (14. Dezember 2005). *Wikipedia.* Von https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Logic-gate-or-us.png abgerufen

Stefan506. (14. Dezember 2005). *Wikipedia.* Von https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Logic-gate-inv-iec.png abgerufen

Stefan506. (14. Dezember 2005). *Wikipedia.* Von https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Logic-gate-and-us.png abgerufen

Tch, A. (4. August 2017). *towardsdatascience.com*. Von https://towardsdatascience.com/the-mostly-complete-chart-of-neural-networks-explained-3fb6f2367464 abgerufen

Wikipedia. (3. Januar 2020). *Wikipedia/Neuron*. Von https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Nervenzelle&oldid=195474238 abgerufen

# Anhang

## Layout/Bestückungsplan von EAGLE

## Schema von EAGLE

## Stückliste

# Deklaration

Hiermit erklären wir, dass wir die vorliegende interdisziplinäre Arbeit selbstständig und in eigener Sprache verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet haben. Wörtliche und sinngemässe Übernahmen aus anderen Quellen wie Büchern, Zeitschriften, Internet, Interviews usw. sind als solche kenntlich gemacht.

Ort:……………………………………………………………………………………………………..

Datum:………………………………………………………………………………………………….

Unterschrift:……………………………………………………………………………………………

Unterschrift:……………………………………………………………………………………………

1. EAGLE ist ein Layouteditor, der es ermöglicht, Leiterplatten zu designen [↑](#footnote-ref-1)
2. Diese Schätzung wurde aus (Wikipedia, 2020) entnommen [↑](#footnote-ref-2)
3. Die Integration ist eine berechnung, die die Fläche unter einer Funktion bzw. Signalverlauf beschreibt [↑](#footnote-ref-3)
4. Botenstoffe die das Signal über die Synapse übertragen [↑](#footnote-ref-4)
5. Um auch eine Verwendung als Integrierte Schaltung zu ermöglichen [↑](#footnote-ref-5)
6. Darunter werden Zusammenhänge, die ein mehrschichtiges Neuronales Netz erfordern, verstanden. [↑](#footnote-ref-6)
7. Die Schaltung wird im Kapitel VI.B Input auf der Seite 14 genauer erklärt. [↑](#footnote-ref-7)
8. Eine kurze Spannungsspitze [↑](#footnote-ref-8)
9. Tri-state ist eine Schaltung derer Ausgang so hochohmig ist, dass sie als nicht vorhanden zählt [↑](#footnote-ref-9)