

**Interaktives Unterrichtsmodell zur Demonstration der
Signalintegration am Axonhügel**

Maturaarbeit
von Marvin Rhyner

Betreut durch Johannes Kottonau
Kantonsschule Frauenfeld
23.10.2023
Biologie

Abstract

The final result of the project is a physical interactive teaching aid for students, to show temporal summation of inhibitory and excitatory postsynaptic potentials.

The first phase of the project involved programming a Microcomputer and drawing the neurons for the front panel of the Model. In a second phase the existing parts were connected with some light technic and a strong plate. The result is a 1.5 square meter large metal plate which shows 6 neurons and over 200 LEDs. With several buttons it is possible to activate and influence the process of the Saltatory conduction on the axon. The Model simplifies the complicate process of bioelectricity and helps students to learn the lesson content faster.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	2
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Dank.....	2
2 Theoretischer Hintergrund	3
2.1 Vorteile und Chancen von interaktiven Modellen und Simulationen im MINT-Unterricht.....	3
2.2 Schlussfolgerungen für das Design	4
2.3 Integration postsynaptischer Potenziale am Axonhügel in Bezug auf das Modell	5
3 Idee	11
3.1 Zielgruppe des Produkts.....	11
3.2 Must-haves	11
3.3 Nice-to-Haves	12
4 Implementation/Realisierung.....	13
4.1 Interface zeichnen und auf Aluplatte lasern.....	13
4.2 Auswählen der LEDs	22
4.3 LEDs zusammenlöten	23
4.4 Welcher Mikrocomputer und erste Programmiererfahrungen	25
4.5 Mikrocomputer verkabeln und Stromversorgung.....	26
4.6 Druckknöpfe für das Modell aussuchen und zusammenlöten	29
4.7 Rahmen, Schutz und Halterung konstruieren	30
4.8 Chronologische Zusammenführung der Komponenten	32
4.9 Finanzierung und Zeitaufwand	34
5 Software	36
5.1 Erstellen einer Programmierumgebung	36
5.2 Kernelemente des Codes.....	37
5.2.1 Legende Druckknöpfe:.....	38
6 Verifikation und Diskussion	44
6.1 Funktionstests und Robustheit	44
6.2 Grenzen des Modells	45
7 Benutzeranleitung und Anwendungsbeispiele.....	45
7.1 Benutzeranleitung und Tastenbedienung.....	45
7.1.1 Transport und Lagerung.....	45
7.1.2 Installation und Aktivierung des Modells	45
7.1.3 Tastenbedienung	46
7.1.4 Deaktivierung des Modells	47
7.2 Typische Use Cases für den Unterricht.....	48
7.2.1 Case 1	48

7.2.2	Case 2	48
7.2.3	Case 3	49
7.2.4	Case 4	49
7.2.5	Case 5	49
7.2.6	Case 6	50
7.2.7	Case 7	50
7.2.8	Case 8	50
7.2.9	Case 9	51
7.2.10	Case 10	51
7.3	Wartung / Updates / Programmiermöglichkeiten.....	52
8	Zusammenfassung.....	53
9	Quellenverzeichnis	54
9.1	Litteraturverzeichnis.....	54
9.2	Abbildungsverzeichnis	54
10	Anhang.....	55
10.1	Rechnungsbelege.....	55
10.2	Befehl autonom aufstarten	60
10.3	CAD Zeichnung Rückplatte	60

1 Einleitung

1.1 Motivation

Ein Thema, dass jede Schülerin¹ in ihrer Schulzeit an der Kantonsschule Frauenfeld durcharbeitet, ist die Neurobiologie. Ein Thema, welches oftmals mit Kopfzerbrechen und vielen Stunden lernen in Verbindung gebracht wird. Zu verstehen, was die Lehrerin erklären möchte, wenn von saltatorischer Erregungsleitung am Axon gesprochen wird, ist vieles, aber sicher nicht einfach, wenn man dazu nur ein Blatt Papier und einige Skizzen hat, auf denen das kurz mal so erklärt wird. Natürlich gibt es dann immer noch eine Lehrperson, die jederzeit helfen kann, das Thema wirklich verstehen muss man aber trotzdem selbst. Eine enorm grosse Hilfe, um etwas besser zu verstehen, ist ein Modell. Ein solches, welches einen Teil der saltatorischen Erregungsleitung am Axon aufzeigt, gibt es auch seit etwa 20 Jahren an der Kantonsschule Frauenfeld. Das Modell hat mir zu der Zeit, als wir dieses Thema behandelt haben, sehr geholfen, um besser zu verstehen, wie Reizleitungen funktionieren. Als es nun darum ging, ein Thema für die Maturaarbeit zu finden, wollte ich eine praktische Arbeit machen im Bereich der Biologie. Mir war wichtig, etwas Bleibendes und Nützliches zu erarbeiten. Ich fand die Idee eines neuen, verbesserten Modells äusserst interessant und nach dem ich die Begeisterung von Herrn Kottonau gespürt habe, wusste ich, dass ich gefunden hatte, wonach ich suchte. Eine Herausforderung, die mich in ein mir bis dahin völlig neues und unbekanntes Terrain führte. Dafür eine Fragestellung zu formulieren war nahezu unmöglich, jedoch ergab sich ein klares Ziel: ein neues, verbessertes Modell zu erschaffen, welches im Schulunterricht dazu dient, Reizleitungen verständlicher zu machen. Es sollte den Schülern eine Hilfe sein, besser und schneller zu verstehen, wie ein bioelektrischer Impuls abläuft. Das Modell setzt sich aus unterschiedlichen Faktoren zusammen. Das Design des Modells, den technischen Aufbau und das Programmieren eines Controllers. Das ganze Modell sollte möglichst nahe an der Realität sein, ohne dabei zu komplex zu werden.

¹ Mit der weiblichen Form ist immer auch die männliche gemeint

1.2 Dank

Einen besonderen Dank möchte ich meinem Vater aussprechen. Sein Wissen als gelernter Elektroingenieur und sein mathematisches Verständnis waren eine grosse Hilfe im Aufbau der Elektronik und dem Programmieren des Codes. Zudem hat er mich in jedem Abschnitt der Maturaarbeit unterstützt und begleitet. Ausserdem möchte ich meinem Nachbarn Hanspeter Strebel und seiner Firma Limec Solutions danken, welche einen grundlegenden Beitrag bei der Umsetzung des Interfaces geleistet haben. Zuletzt möchte ich mich bei meinem betreuenden Lehrer Johannes Kottonau bedanken. Seine aufrichtige Freude und Hingabe für dieses Projekt haben einen grossen Teil zu dem Modell und dem gesamten Prozess beigetragen. Ein herzliches Dankeschön an alle Beteiligten, die zum Erfolg dieser Maturaarbeit beigetragen haben.

2 Theoretischer Hintergrund

Im Theoretischen Hintergrund wird genauer darauf eingegangen welchen Einfluss Modelle im Unterricht überhaupt haben und was dies für mein Modell bedeutet. Zudem wird erklärt, was das Model überhaupt genau zeigt.

2.1 Vorteile und Chancen von interaktiven Modellen und Simulationen im MINT-Unterricht

Meine eigenen positiven Erfahrungen mit der Wirksamkeit eines interaktiven Modells beim Lernen komplexer Sachverhalte wie der temporalen Summation inhibitorischer und exzitatorischer postsynaptischer Potenziale werden durch mehrere Studien bestätigt. Tatsächlich besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen Lernverhalten und -erfolg und dem Gebrauch von interaktiven Simulationen und Modellen im Unterricht. Ein gross angelegter Review fand vor gut 10 Jahren statt, in 49 von 61 ausgewerteten Studien wurde ein positiver Wirksamkeitsunterschied zwischen Unterricht ohne und Unterricht mit Unterstützung durch interaktive Modelle und Simulationen festgestellt. (International Journal of Science Education, 2012). Hervorgehoben wird ausserdem, dass Unterrichts Modelle besonders gut den Fokus der Schülerinnen auf die wesentlichen Aspekte eines bestimmten Konzepts lenken können. Interaktive Unterrichts Modelle scheinen sowohl die mentale Beteiligung (Involvement) als auch die Freude am Unterricht zu erhöhen. (Computers & Education, 2014). Die internetbedingt leichte und oft auch kostengünstige Verfügbarkeit von technischen Bauteilen wie auch Konstruktionsanleitungen ermöglicht es zunehmend, interaktive Modelle autodidaktisch in der eigenen Werkstatt herzustellen. Dies ermöglicht grundsätzlich jeder Schule den Zugang zu Modellen, um ihren Unterricht zu bereichern.

Interessant sind die Analogien zwischen einem klassischen Experiment und einem Experiment mit einem interaktiven Unterrichts Modell bzw. einer Computersimulation. Der Ablauf eines klassischen Experiments folgt einem bestimmten Schema. Auf eine Fragestellung folgt die Bildung von Hypothesen und der Entwurf eines geeigneten experimentellen Designs. Die Resultate des Experiments werden ausgewertet und diskutiert. Daraufhin können neue Fragestellungen gebildet werden und der Zyklus wiederholt sich. Ein interaktives Modell bietet dieselben Möglichkeiten zur Gewinnung neuer Erkenntnisse. Es lässt die Lernenden eine Fragestellung finden und diverse Hypothesen bzw. Erwartungen an das Modell verhalten bilden. Die Hypothesen können daraufhin durch Ausprobieren am Modell getestet werden. Ein Modell ermöglicht es auch, bestimmte zentrale Lerninhalte mithilfe visueller Methoden in den

Vordergrund zu rücken. Im vorliegenden Modell werden beispielsweise die Mechanismen, welche für die Signalintegration am Axonhügel wesentlich sind, mithilfe der LEDs besonders augenfällig gemacht. Mithilfe dieses Modells ist es nicht nur möglich, den Ablauf der Signalintegration darzustellen, sondern zusätzlich die Geschwindigkeit des Ablaufes an die Lernenden anzupassen. So können die Schülerinnen einzelne aufeinanderfolgende Schritte besser nachvollziehen, Hypothesen aufstellen und spezifische Fragen stellen. Gleichzeitig erlaubt es dem Lehrer, im richtigen Moment die Simulation zu unterbrechen und den Schülern etwas zu erklären, Fragen zu stellen oder Unklarheiten aufzudecken.

Nachteile von Modellen und Simulationen sind nur wenige vorhanden. Vorausgesetzt natürlich, dass das Modell 100 % richtig ist und optimal funktioniert. Die häufigste Fehlerquelle ist dabei der Mensch. Entweder aufgrund von Unwissenheit, Unachtsamkeit oder Fehlern in der Entwicklung. Ein Modell entspricht niemals 1:1 der Realität, so auch dieses Modell. Beispielsweise wird eine viel zu tiefe Zahl an Inputneuronen suggeriert, diese beläuft sich im Normalfall auf 8'000 bis 10'000, im Modell sind es nur 2. Auch die Geschwindigkeit der Erregungsleiter oder die Grösse der Nervenzellen stimmen nicht mit der Realität überein. Zudem muss das Modell so einfach sein, dass die Schülerinnen korrekte Hypothesen aufstellen können und diese das Modell bestätigt. Erfolgserlebnisse sind die Grundlage jeglichen menschlichen Lernens!

2.2 Schlussfolgerungen für das Design

Das Modell muss visuell ansprechend und inhaltlich korrekt sein. Dies ist vor allem für die Zeichnung des Interfaces elementar. Ausserdem muss das Modell interaktiv sein. Sodass sich durch Input der Output offensichtlich verändert. Dies hat zur Folge, dass das Modell auch dementsprechend so robust aufgebaut sein muss, dass es den häufigen Gebrauch im Unterricht möglichst lange mitmacht. Natürlich spielt auch die Grösse des Modells eine Rolle damit während dem Präsentieren alle sehen können, was erklärt wird und was gemeint ist. Eine grundlegende Entscheidung ist auch, welche Inhalte das Modell darstellen können sollte. Ist es zu einfach, werden die Schülerinnen schnell gelangweilt, ist es zu komplex, sind sie frustriert. Somit war es eine Gratwanderung auszubalancieren, was das Modell alles können sollte und was extern erklärt werden muss. Zudem ist wichtig, dass das Modell pausiert und die Geschwindigkeit angepasst werden kann, sodass unter Kapitel 2.2. erklärte Aspekte von Hypothesen testen, Fragen stellen und die Unterrichtsgeschwindigkeit den Schülern anpassen, erfüllt werden können.

2.3 Integration postsynaptischer Potenziale am Axonhügel in Bezug auf das Modell

Um zu verstehen, was das Modell zeigt, sind basale Kenntnisse über den Aufbau einer Nervenzelle nötig. Der Aufbau einer Nervenzelle sagt bereits einiges über deren Hauptfunktion aus. Neuronen sind lang gezogene Zellen, welche über einen Meter lang werden können. Der Durchmesser des Zellkörpers bleibt aber meist geringer als 0.1 mm. Eine Nervenzelle lässt sich in drei Bereiche unterteilen, welche unterschiedliche Funktionen haben. Der erste Bereich, der Zellkörper ist das biosynthetische Zentrum der Zelle. Dieser enthält Zellkern und Zellorganellen. Der zweite Bereich, die Dendriten, sind Zellfortsätze, welche wie ein Wurzelsystem weit verzweigt sind. Sie ragen in drei allen Richtungen in den Raum, damit sie eine grösstmögliche Oberfläche zum Empfang von Signalen erreichen. An den Dendriten gibt es mehrere Tausend Verbindungen mit anderen Nervenzellen. Die Verbindungsstellen werden Synapsen genannt. Der dritte Bereich, das Axon, auch Nervenfasern genannt, ist ein meist sehr lang gezogener Zellfortsatz. Über das Axon werden die von den Dendriten aufgenommenen und am Axonhügel integrierten Signale zu den präsynaptischen Endigungen weitergeleitet.

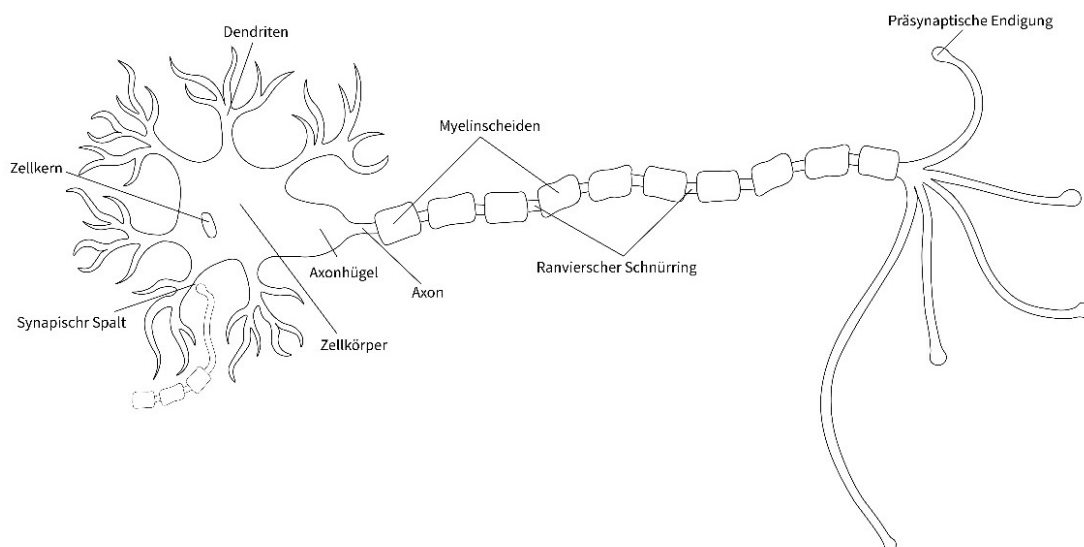


Abbildung 1: beschriftete Nervenzelle

Das Axon teilt sich nach seinem Ende in viele verdickte Strukturen auf, welche präsynaptischen Endigungen genannt werden. An diesen findet die Signalübertragung auf andere Neuronen statt. (Postsynaptische Neuronen)

Das Axon wird stellenweise von Myelinscheiden isoliert, die dazwischen liegenden Stellen nennt man ranviersche Schnürringe. Die Zellmembran der ranvierschen Schnürringe trägt Ionenkanäle, welche Ionenströme zulassen, wogegen die myelinisierten Bereiche gegen jegliche Ionenströme mit Hilfe von myelinhaltigen Zellen komplett abgedichtet sind.

Grundsätzlich muss man nun wissen, dass Sinnes-, Muskel- und Nervenzellen die Fähigkeit haben, zwischen Zellinnerem und Zelläusserem eine elektrische Spannung aufzubauen. Dabei zeigt das Zellinnere im Vergleich zum Zelläusseren im Ruhemodus eine Potenzialdifferenz von etwa -60 mV.

Der Axonhügel zwischen Zellkörper und Axon hat folgende wichtige Funktion bei der Erregungsleitung. Er summiert negativ und positiv geladene herbeidiffundierende Ionen zum Ruhepotenzial. Dieses kann das Schwellenpotenzial von ca. -30 mV überschreiten und eine Potenzialumkehr auslösen. Diese Umkehr läuft in den folgenden Schritten ab: Das Überschreiten des Schwellenpotenzials strömen Na^+ -Ionen in das Neuron ein. Dies lässt das Membranpotenzial ins Positive überschlagen, wodurch ein elektrisches Feld zwischen den Schnürringen entsteht. Die einströmenden Na^+ -Ionen «schieben» (bewegt durch das elektrische Feld) die vorhandenen Kationen eine winzige Strecke durch das Axon. Durch das Schieben erscheinen am nächsten ranvierschen Schnürring praktisch im selben Moment zahlreiche Kationen, welche das Membranpotenzial auf ca. 0mV heben. Das Axon, welches durch die Myelinscheiden isoliert ist, lässt kein Ion aus der Membran diffundieren. Alle Kationen bewegen sich somit entlang des Axons, ohne dass auch nur eines verloren geht. Diese Bewegung zieht sich durch das gesamte Axon fort und sieht folgendermassen aus: Während bei einem Schnürring durch die herangeschobenen Kationen das Schwellenpotenzial bereits überschritten ist und Na^+ -Ionen einströmen, kommen beim nächsten Schnürring die ersten Kationen erst an. Das Schwellenpotenzial ist dort noch nicht überschritten und es strömen noch keine Na^+ -Ionen ein. An dem darauffolgenden Schnürring ist noch überhaupt kein Kation angekommen und es herrscht noch das Ruhepotenzial von etwa -60 mV. Dieses Weiterleiten der ersten Potenzialumkehr am Axonhügel in Richtung präsynaptische Endigungen wird auch saltatorische Erregungsleitung genannt, wobei das Signal rasend schnell von Schnürring zu Schnürring in Richtung präsynaptische Endigungen «springt». Diese saltatorische Erregungsleitung wird im Modell in Form der gelben LEDs dargestellt.

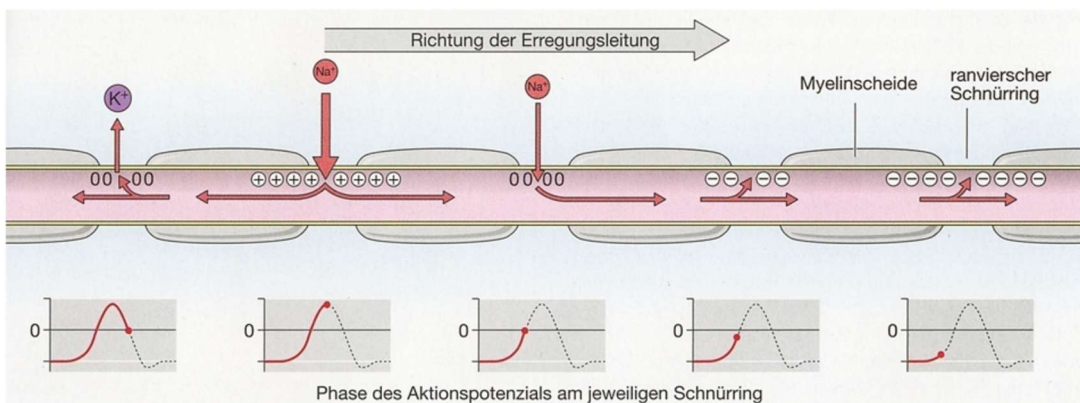


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Saltatorische Erregungsleitung entlang des Axons

Nachdem das Schwellenpotenzial überschritten wurde, wird die Klappe für die einströmenden Na^+ -Ionen geschlossen und es strömen keine weiteren Na^+ -Ionen ins Zellinnere. Zusätzlich öffnen sich viele K^+ -Kanäle, durch welche die Kaliumionen entweichen können dadurch wird nach einer kurzen Hyperpolarisation möglichst schnell das Ruhepotenzial wieder erreicht.

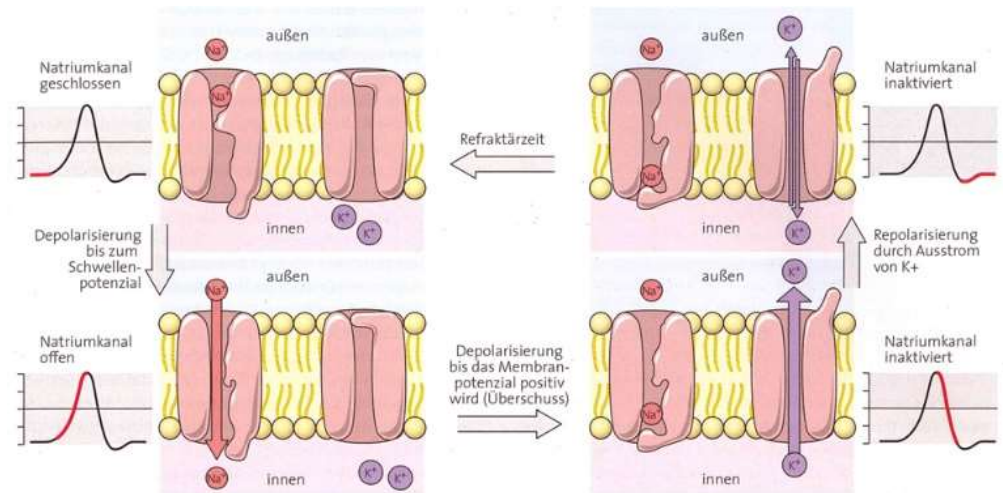


Abbildung 3: Vorgänge an der Zellmembran während eines Aktionspotenzials.

Die Signalübertragung von Neuron zu Neuron an den Synapsen funktioniert folgendermassen. Die Synapse umfasst drei Bereiche: Die erste ist die präsynaptische Endigung. Darin befinden sich Hunderte synaptische Membranbläschen (Vesikel). Diese sind mit einer Überträgersubstanz gefüllt, welche Neurotransmitter genannt wird. Der zweite Bereich ist der synaptische Spalt, welcher sich zwischen den beiden Neuronen befindet. Der winzige Spalt ist mit einer gelartigen Flüssigkeit gefüllt, welche die beiden beteiligten Neuronen in ihrer Position hält. Der dritte Bereich ist die Zellmembran des postsynaptischen Neurons. Diese nimmt die Informationen an der Synapse entgegen.

Trifft ein Nervenimpuls an einer präsynaptischen Endigung ein, wird eine letzte Potenzialumkehr ausgelöst. Noch einmal drängen Na^+ -Ionen in die Zelle und sorgen für eine Umkehr des Membranpotenzials, d.h. von negativ zu positiv. Es sind nun Kalziumkanäle, welche dieses Ereignis

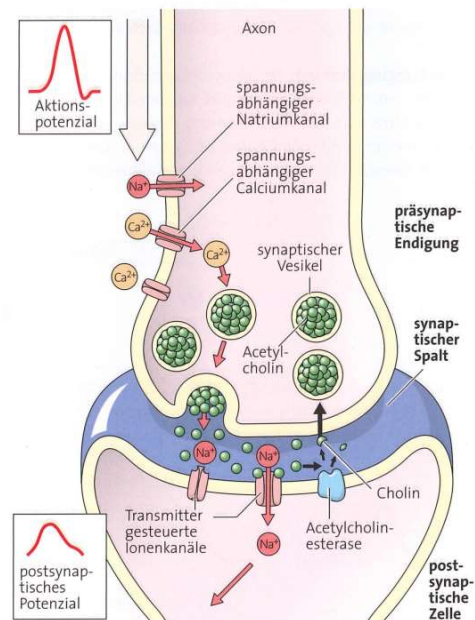


Abbildung 4: Signalübertragung an einer Synapse. Als Beispiel für einen Transmitter wurde hier Acetylcholin gewählt.

registrieren. Sie sind ebenso wie Natriumkanäle spannungsabhängig: Die Türe dieser Kanäle öffnet sich, wenn das Membranpotenzial von negativ auf positiv umschlägt. Insgesamt bewirken die Kalziumkanäle, dass die Konzentration von Kalziumionen in der präsynaptischen Endigung umso stärker ansteigt, je grösser die Frequenz der eintreffenden Nervenimpulse ist (Frequenz = Anzahl pro sec). Der Anstieg der Kalziumkonzentration bewirkt, dass die synaptischen Vesikel beginnen, mit der präsynaptischen Zellmembran zu verschmelzen. Jedes Vesikel enthält mehrere Tausend Neurotransmitter-Moleküle. Wie viele Vesikel ihren Inhalt in den synaptischen Spalt ergiessen, hängt vom Anstieg der Kalziumkonzentration ab. Die Transmittermoleküle diffundieren durch die gelartige Flüssigkeit im synaptischen Spalt rasch zur postsynaptischen Membran. Diese enthält transmittergesteuerte Ionenkanäle, die nur dann offen sind, wenn der passende Transmitter an sie bindet. Die Öffnung dieser Ionenkanäle bleibt zeitlich begrenzt, denn der Neurotransmitter wird durch Enzyme schnell wieder abgebaut. Das Öffnen der transmittergesteuerten Ionenkanäle bewirkt also einen Ionenstrom, der so lange dauert, wie Transmitter im synaptischen Spalt vorhanden ist. Durch den Ioneneinstrom verändert sich im Bereich des synaptischen Spalts das Membranpotenzial in der postsynaptischen Zelle. Die Amplitude der Potenzialänderung ist variabel, sie hängt von der Zahl der geöffneten Ionenkanäle und damit von der ausgeschütteten Transmittermenge ab. Im Falle einer stimulierenden Synapse sind die transmittergesteuerten Ionenkanäle Na^+ -Kanäle. Die einströmenden Na^+ -Ionen diffundieren entlang des Konzentrationsgefälles in das Zytoplasma des postsynaptischen Neurons. Ein Teil davon gelangt zum Axonhügel. Nervenzellen empfangen über Synapsen an den Dendriten Informationen von bis zu 10'000 anderen Neuronen. Dabei heisst «Informationen empfangen» biochemisch gesehen «Ionenströme empfangen». Wir erinnern, dass postsynaptisch an jeder Synapse transmittergesteuerte Ionenkanäle sitzen. Im Fall einer stimulierenden Synapse lassen diese Kanäle bei Ankunft eines Aktionspotenzials eine Portion positive Ladung (in Form von Kationen) ins Cytoplasma der Empfängerzelle einströmen. *Im Modell als rote LED im Zellkörper dargestellt*; im Fall einer hemmenden Synapse ist es eine Portion negative Ladung (in Form von Anionen). *Im Modell als grüne LED im Zellkörper dargestellt* Was fängt die Zelle mit all diesen Ladungen an? Was muss sie tun, um darauf sinnvoll zu reagieren? Die Antwort ist, dass sie überhaupt nichts tun muss. Die Diffusion erledigt alles für sie. Die Ionen können sich im Cytoplasma frei bewegen, sie diffundieren zufällig in alle Richtungen. Dabei diffundieren einige von ihnen auch zum Axonhügel. Quasi als «Echo» von jedem einzelnen Ioneneinstrom erscheint ein Teil der eingeströmten Ionen am Axonhügel und beeinflusst das dortige Membranpotenzial: Kationen heben es an, Anionen senken es ab. Das aktuelle

Membranpotenzial ist nichts anderes als das Ruhepotenzial (-60 mV) plus alle gerade herbeidiffundierenden Kationen minus alle gerade herbeidiffundierenden Anionen, also ein simples Aufsummieren der aktuell vorhandenen Ladungen. Sobald das Resultat über dem Schwellenpotenzial (-30 mV) zu liegen kommt, wird eine Potenzialumkehr ausgelöst; solange das Resultat darunter liegt, «schweigt» die Zelle (Alles-oder-nichts-Prinzip).

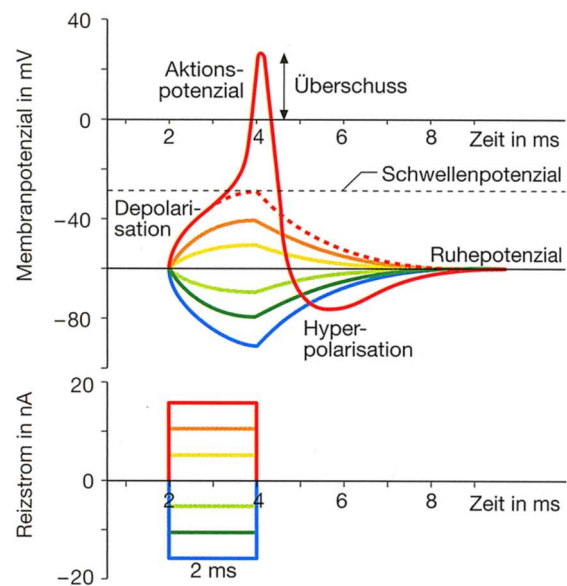


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf eines Aktionspotenzials.

Dieses Prinzip am Axonhügel wird mit dem entworfenen Modell dargestellt. Die Frequenz, mit welcher Nervenimpulse losgeschickt werden, ist ein Mass dafür, wie stark die Stimulation ist. Wenn die Stimulation nur schwach ist, werden entsprechend wenig Neurotransmitter freigesetzt und das Potenzial an der postsynaptischen Membran verändert sich nur langsam. *Im Modell wird das mit den Knöpfen C, E, N und P angesteuert. Wenn eine dieser Tasten gedrückt wird, ist der Abstand zwischen den gelben LED maximal. Dies ist gleichbedeutend mit Nervenimpulsen, welche in einem grossen zeitlichen Abstand ankommen. Die Summation am Axonhügel findet dementsprechend langsam statt.* Wenn die Stimulation hingegen hoch ist, kommen viele Nervenimpulse in den präsynaptischen Endigungen an. Dadurch werden entsprechend viele Neurotransmitter freigesetzt und dementsprechend schnell steigt oder sinkt das Membranpotenzial.

Dadurch werden dann wieder in einer hohen Frequenz

Nervenimpulse

losgeschickt. *Im Modell wird das mit den Knöpfen A, G, L und R angesteuert.*

Wenn eine dieser

Tasten gedrückt wird, ist der Abstand zwischen den gelben LED minimal. Dies ist

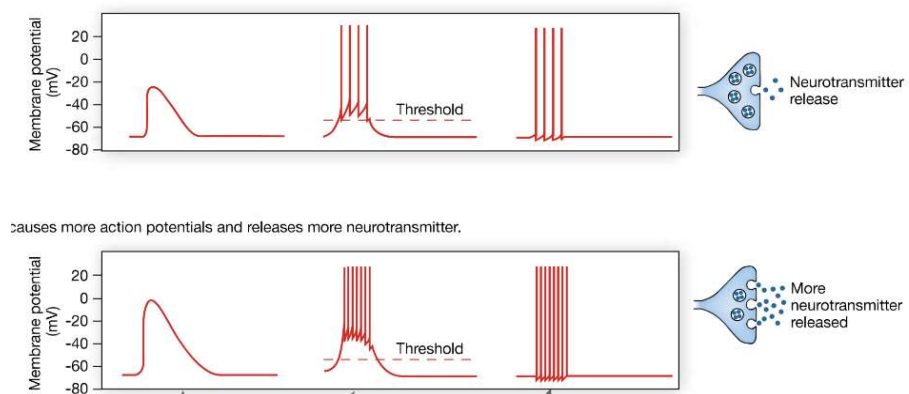


Abbildung 6: Intensität der Stimulation. Je mehr Neurotransmitter in der Nervenzelle ankommen, desto mehr Nervenimpulse werden weitergeschickt. Der Pfeil ganz links zeigt auf die Menge an einströmenden Ionen am Axonhügel. Der mittlere und der rechte Pfeil zeigen die Konsequenz daraus, wie viele Nervenimpulse weitergeleitet werden.

gleichbedeutend der Nervenimpulse, welche in einem kurzen zeitlichen Abstand zueinander in den Synapsen ankommen. Die Summation am Axonhügel findet sehr schnell statt. Wie viele Nervenimpulse an der Synapse ankommen, ist ein stufenloser Vorgang. Um im Modell trotzdem zeigen zu können, dass unterschiedlich viele Neurotransmitter freigesetzt werden können, gibt es eine mittelstarke Stufe, welche mit den Tasten B, F, M und Q angesteuert wird. Ist eine dieser Tasten gedrückt, ist der Abstand zwischen den gelben LEDs der Mittelwert zwischen sehr schnell und langsam. Wenn ausreichend Kationen am Axonhügel angesammelt werden, wird das Schwellenpotenzial früher oder später erreicht. Ist dies der Fall, wird ein Impuls wieder weitergeleitet. Dasselbe Prozedere wiederholt sich dann an der nächsten Nervenzelle. Dies wird am Modell genau so dargestellt. Wenn ausreichend rote LED angesammelt sind,

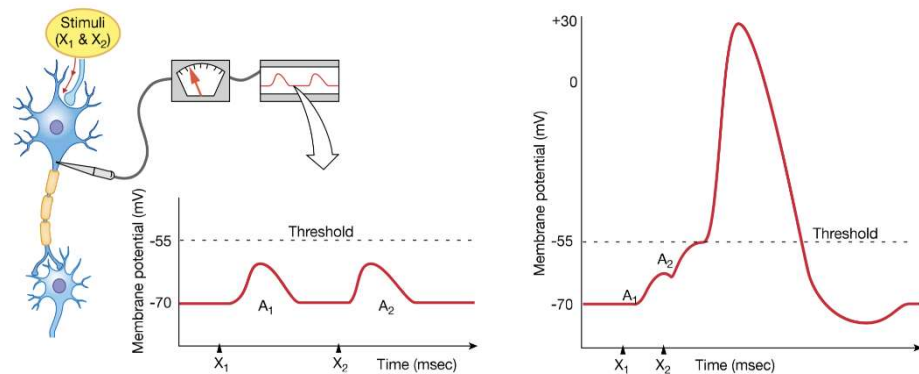


Abbildung 7: Alles oder nichts Prinzip, wenn die Stimulation nicht ausreicht oder in einem zu grossen zeitlichen Abstand eintrifft, wird kein Nervenimpuls losgeschickt. Ist die Stimulation hingegen genug stark oder in ausreichend kurzem Zeitabstand, wird das Schwellenpotenzial erreicht und ein Nervenimpuls wird weitergeleitet.

erlöschen alle und ein Nervenimpuls wird weitergeleitet. Schematisch sind dafür drei weitere Nervenzellen gezeichnet, an denen dargestellt wird, dass sich dieser Vorgang wiederholt. Wenn in einem zu langen Abstand keine neuen Nervenimpulse in den Synapsen ankommen oder das Schwellenpotenzial nie erreicht wird, diffundieren die bereits angesammelten Kationen oder Anionen vom Axonhügel weg (sie lecken durch die Zellmembran), bis sich auch am Axonhügel wieder das Ruhepotenzial einstellt. Dieser Vorgang ist am Modell ebenfalls dargestellt. Wenn zu lange kein neuer Impuls am Axonhügel ankommt, erlöschen die bereits angesammelten LEDs wieder. (Physiologie, 2009)

3 Idee

In diesem Kapitel werden die Grundbedingungen unter den Aspekten der Zielgruppe, der Funktionen und des Designs für dieses Modell genauer betrachtet.

3.1 Zielgruppe des Produkts

Das Modell verfolgt zwei Zielgruppen. Einerseits Schülerinnen im naturwissenschaftlichen Bereich auf tertiären Ausbildungsstufe, andererseits zugehörige Lehrkräfte, welche in den Fächern Biologie, Chemie oder auch Sporttheorie unterrichten.

3.2 Must-haves

Die Must-haves meiner Idee waren, ähnlich dem Vorgänger ein physisches Modell zu entwickeln, mit dem Bioelektrizität darstellbar ist. Für eine hochwertige Grundlage meines Modells sollte eine Metallplatte dienen, auf der mehrere Nervenzellen 2-dimensional und vereinfacht abgebildet sind. In die Platte eingesetzte LED²s stellen dann die Impulse dar. Für eine möglichst einfache und zuverlässige Ansteuerung der LEDs werden Druckknöpfe oder Potenziometer verwendet.

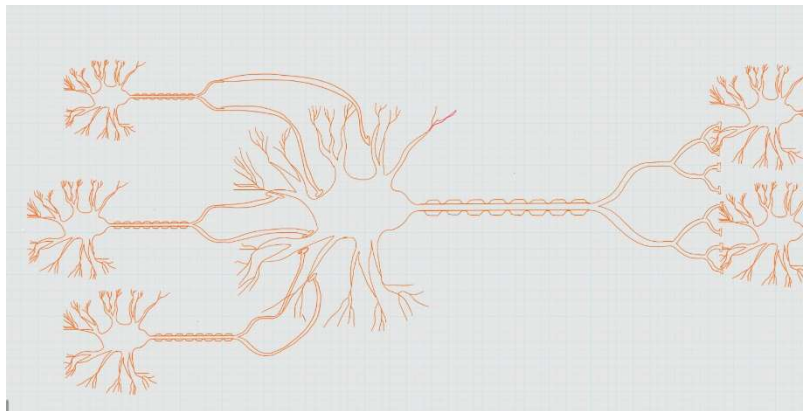


Abbildung 8: Skizze Grundidee

Damit sind die groben

Rahmenbedingungen bereits gegeben. Voraussetzung für dieses Modell war zudem ein verbessertes Interface im Vergleich zum vorherigen Modell. Das Interface muss so gross sein, dass alle Details gut erkennbar sind. Beispielsweise sollte beim Betrachten der Nervenzellen erkennbar sein, dass zwischen den präsynaptischen Endigungen und den postsynaptischen Zellen der synaptische Spalt ist. Der Zellkörper ist ausserdem bis in die Dendriten mit Zellplasma gefüllt und kann dadurch nicht beliebig dünn auslaufen, wie in der Abbildung 8 falsch gezeichnet ist. Die Anzahl und Verteilung der Nervenzellen sind so gewählt, dass erkennbar ist, wie die Nervenzellen miteinander interagieren. Die Nervenzellen müssen wie auch echte Nervenzellen sowohl hemmend als auch stimulierende Impulse darstellen können. Die stimulierenden Impulse müssen sich ansammeln, bis das Schwellenpotenzial am Axonhügel überschritten wird und ein ebenfalls mit LEDs dargestellter Impuls „losgeschickt“

² Light Emitting Diode

wird. Die hemmenden Impulse müssen ebenfalls am Axonhügel angesammelt werden, dürfen einen bestimmten Schwellwert aber niemals übersteigen. Ausserdem muss ein „neutraler“ (nicht leuchtender) Impuls darstellbar sein, während die andere Nervenzelle unabhängig davon aktiv ist. Hemmende und stimulierende Impulse werden ihren Ionen entsprechend mit unterschiedlichen Farben dargestellt. Kommt zu lange kein Impuls, werden die bereits angesammelten Ionen am Axonhügel abgelöscht. Zudem sollten die Impulse nur in den ranvierschen Schnürringen sichtbar sein. Die Intensität des hemmenden und stimulierenden Impulses muss jeweils drei unterschiedlichen Levels entsprechen. Auch eine Pause und Play Funktion muss gegeben sein. Ausserdem muss das Modell mobil, robust und autonom funktionieren. Mit diesen Bedingungen waren die Grundsteine für dieses Modell gelegt.

3.3 Nice-to-Haves

Das Modell ist mit den Must-haves bereits sehr genau geplant. Die Nice-to-Haves sind während des Arbeitsprozesses hinzugekommen. Dazu zählen eine weitere Taste für eine Variable Geschwindigkeit. Sie ermöglicht eine sehr langsame, mittlere und schnelle Geschwindigkeit. Ausserdem eine Reset Taste, welche es ermöglicht, ein neues Unterrichtsbeispiel zu zeigen, ohne das komplette System neu starten zu müssen. Als krönender Abschluss kam eine äusserst hochwertige Rückplatte hinzu, welche dem Modell einen guten Schutz vor Beschädigungen bietet und ein sehr elegantes Gesamtbild gibt.

4 Implementation/Realisierung

In Kapitel 4 wird der gesamte Arbeits und Entwicklungsprozess des Modells genau erklärt und in chronologischer Reihenfolge beschrieben.

4.1 Interface zeichnen und auf Aluplatte lasern

Das Interface wurde in enger Zusammenarbeit mit Johannes Kottonau und Hanspeter Strebel ausgearbeitet. Für eine möglichst hohe Qualität und Langlebigkeit des Modells ist die Wahl des Materials für die Metallplatte auf eine eloxierten Aluminiumplatte gefallen. Diese sollte mithilfe eines Lasers die Nervenzellen auf die Aluplatte gravieren. Gleichzeitig ist es mit einem Laser auch möglich, die Löcher für die LEDs zu machen. Für die Aluplatte und den zugehörigen Laserauftrag kommt die Firma Limec Solutions ins Spiel, welche unter anderem im Bereich der Metallverarbeitung tätig ist. Der General Manager von Limec Solutions, Hanspeter Strebel mein Nachbar, hat mir angeboten, mich in diesem Projekt zu unterstützen und meine Vorstellung mit mir umzusetzen. Die Nervenzelle werden am Computer oder Ipad gezeichnet. Dies hat den Vorteil, Anpassungen vorzunehmen, bis das Modell genau den Vorstellungen entspricht. Ein erster Entwurf wurde ähnlich der Nervenzelle des vorhergehenden Modells auf OneNote gezeichnet.

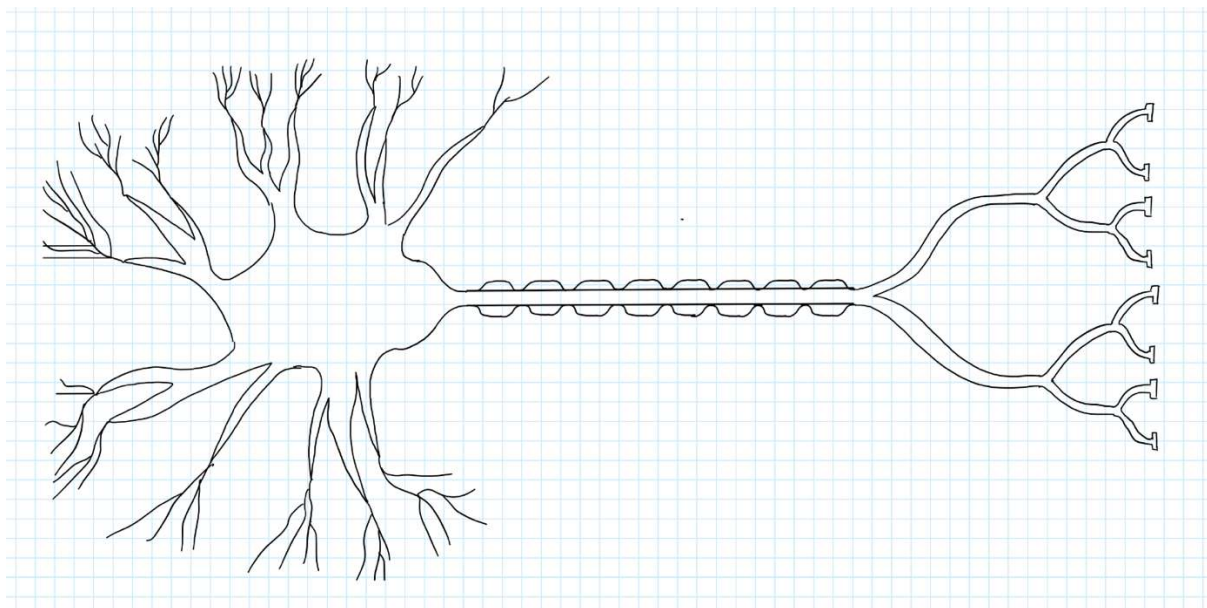


Abbildung 9: Skizze erste Nervenzelle

Der Entwurf auf Abbildung 9 diente vor allem zur ersten Orientierung, wie die Nervenzellen aussehen sollte. Basierend auf diesem Entwurf wurde auch ein erstes Interface mit mehreren Nervenzellen gemacht, um über das Verhältnis der Grössen und die Anzahl der Nervenzellen diskutieren zu können.

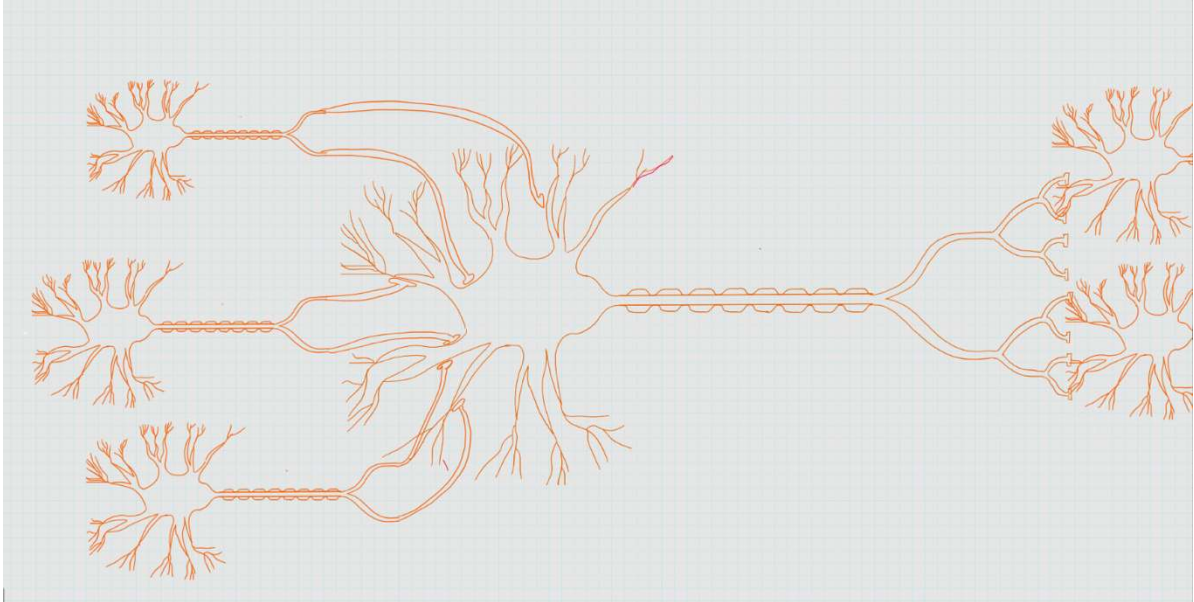


Abbildung 10: Skizze mit mehreren angeordneten Nervenzellen

Schnell wurde klar, dass OneNote nicht reicht, um die Anforderungen an das Interface zu erfüllen. OneNote lässt nur einen bestimmten Prozentsatz an Zoom zu, für dieses Interface ist es aber von grosser Bedeutung auch Details so genau wie möglich zu zeichnen. Ausserdem lassen sich einzelne Ausschnitte nicht drehen, weswegen in den Entwürfen die Nervenzelle parallel sind. Ein weiteres Problem ist das OneNote nicht die Möglichkeit bietet Dokumente in beliebigen Formaten zu exportieren. Somit ist es nahezu unmöglich, später das Interface auf eine Platte zu übertragen. Das Zeichnungsprogramm Adobe Illustrator hingegen eignet sich für diese Art von Projekt Ideal und wird deswegen auch verwendet. Die Erkenntnisse bezüglich Form und Anordnung konnten trotzdem aus dem Versuch auf OneNote übernommen werden.

Grundlage des Versuches auf Abbildung 11 sind 6 Nervenzellen, welche in der Anordnung 2:1:3 sind. Damit soll dargestellt werden, dass jede Nervenzelle mit viele Nervenzellen verbunden ist. Die linksliegenden Nervenzellen stellen den Ursprung des Impulses dar. Damit soll offensichtlich werden, dass Impulse durch viele aneinandergereihte Nervenzelle weitergeleitet werden. Die Grössenverhältnisse und Liniendicke ist darauf ausgelegt, dass die mittlere Nervenzelle zentral erscheint. Dies entspricht nicht der Realität, ermöglicht aber einen Fokus auf den Ablauf im Inneren der Nervenzelle genauer zu betrachten. Durch die grössere Nervenzelle lassen sich auch mehr LEDs einsetzen, was genauer nachvollziehen lässt, was am Axonhügel passiert. Die rechtsliegenden Nervenzellen stellen dar, wie der Impuls von der mittleren Nervenzelle aus weitergeleitet wird.

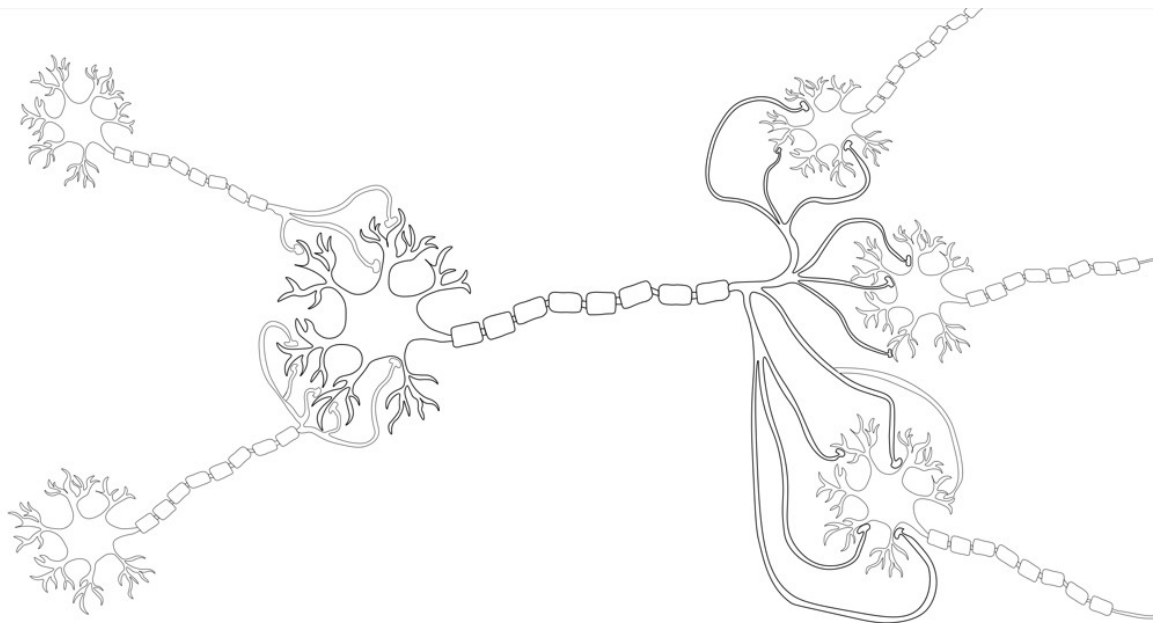


Abbildung 11:erster Adobe Illustrator Entwurf

In einem zweiten Entwurf auf Adobe Illustrator, Abbildung 12, wurde für eine übersichtlichere Darstellung die Anzahl und die Form der Synapsen angepasst. Aus visuellen Gründen wurde die Anzahl der Myelinscheiden von 8 auf 10 erhöht und auch die Form der Dendriten wurde geglättet und verbessert. Um der Realität möglichst nahe zu kommen, wurde auch die Form der präsynaptischen Endigung angepasst und ein Zellkern hinzugefügt.



Abbildung 12: zweiter, verbesserter Adobe Illustrator Entwurf

In einem dritten Entwurf, Abbildung 13, wurde die axiomatische Verzweigung, welche zu der Neurone rechts unten führt, geglättet und verkürzt. Ausserdem wurden die Abstände des synaptischen Spaltes bei allen Synapsen angeglichen.

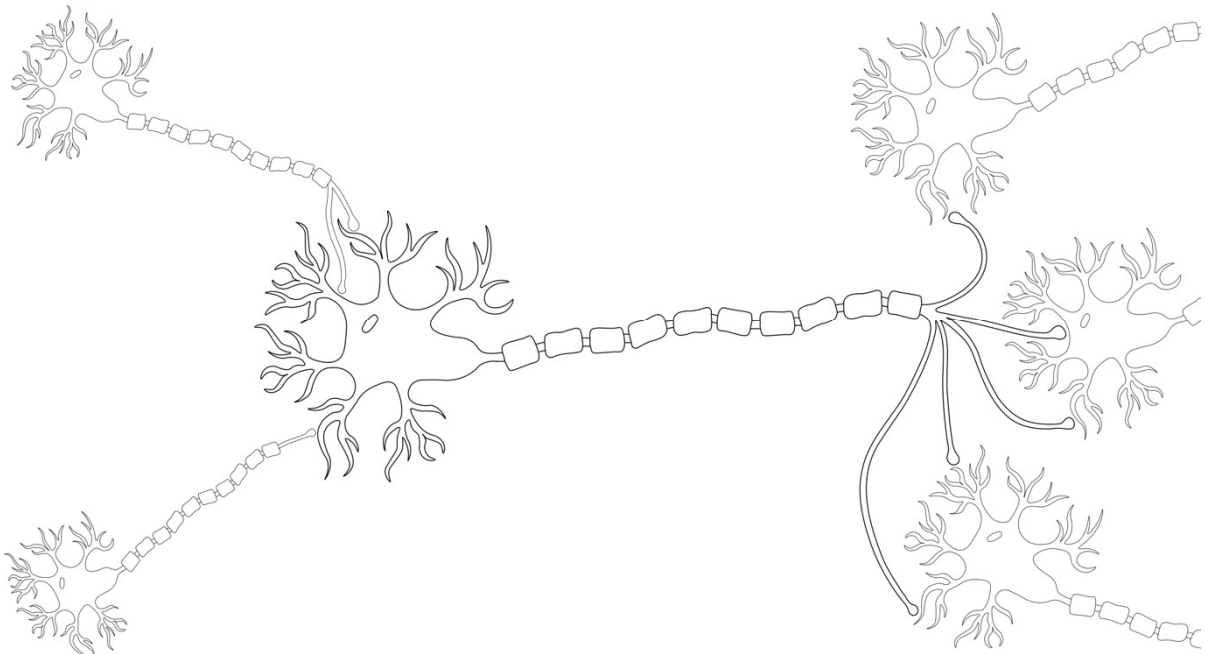


Abbildung 13: dritter Adobe Illustrator Entwurf

Im vierten Entwurf, Abbildung 14, wurden alle Abstände in den synaptischen Spalten nochmal leicht verändert und exakt gleich gross gemacht.



Abbildung 14: vierter Adobe Illustrator Entwurf, Nahezu fertiger Entwurf, welcher dem Design des schlussendlichen Modells entspricht.

Der vierte Entwurf hat dem entsprochen, wie Herr Kottonau und ich es uns vorstellten. Dieser Entwurf wurde dann mit Adobe Acrobat auf Papier gedruckt, um ein Gefühl für die Grösse des Modells zu bekommen. Der erste Versuch war jedoch mit vier mal fünf A4 Papieren im Querformat zu klein, weswegen ein zweiter grösserer Versuch gedruckt wurde. Dieser hatte die richtige Grösse und das Modell ist schlussendlich auf 900 mm x 1500 mm skaliert worden.

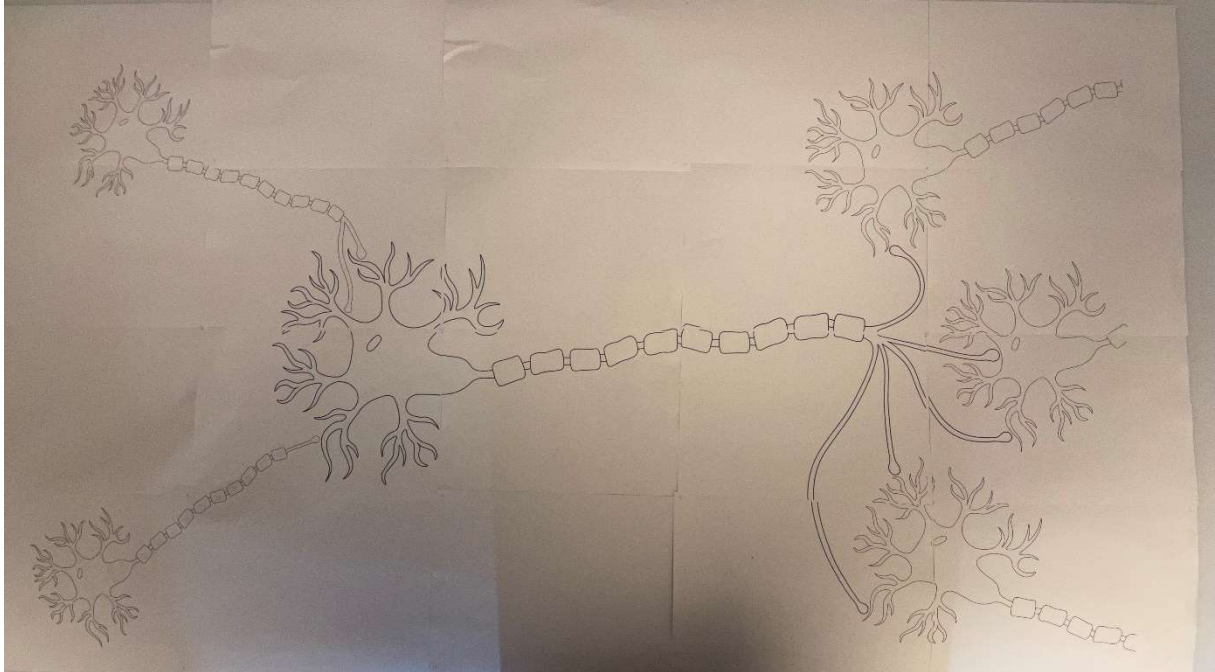


Abbildung 15: Erste ausgedruckte, zu kleine Version (4x5 A4 Blätter im Querformat)

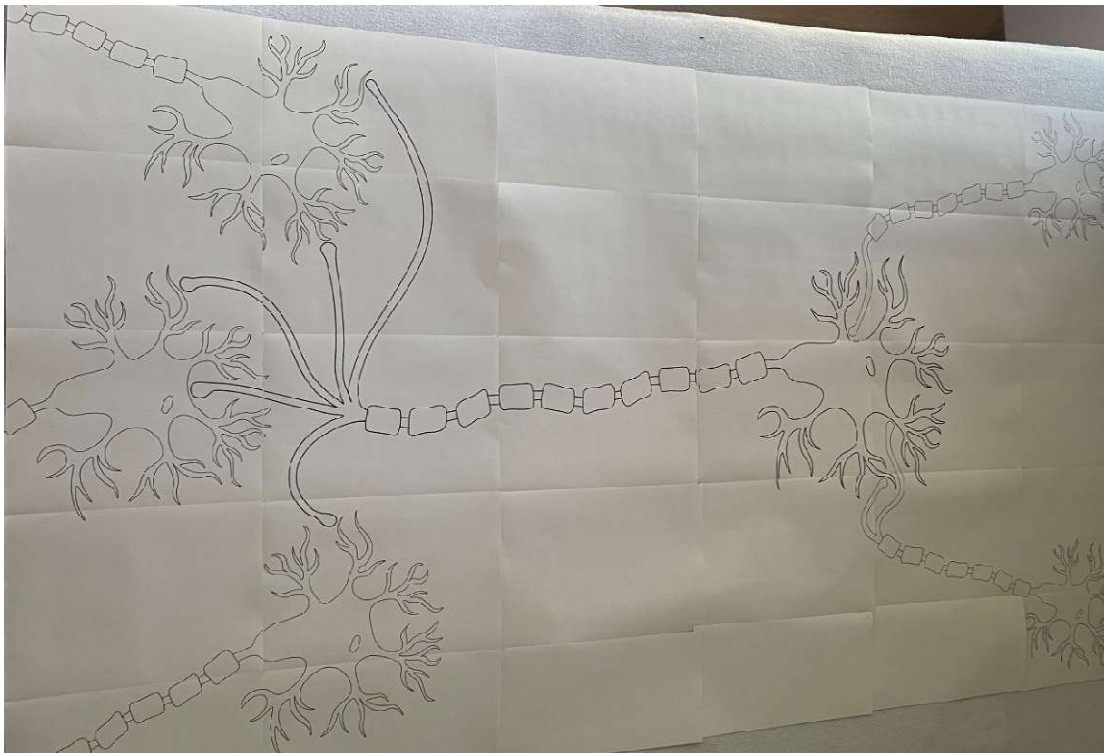


Abbildung 16: Passende ausgedruckte Version 1500mm x 900mm (5x6 A4 Papiere im Querformat)

Damit sollte auch in der hintersten Reihe der Schulbänke sichtbar sein, was erklärt wird und trotzdem bleibt das Modell in dieser Grösse mehr oder weniger handlich. Ausserdem konnte nun durch die jetzt bekannte Skalierung die Breite der Synapsen und der ranviersche-Schnürringe angepasst werden, sodass die LEDs, welche 5mm x 5mm gross sind, auch an den engsten Stellen passend sind. Dies war wichtig, dass die Löcher für die LEDs nicht die Linien der Nervenzellen schneiden. Um die LEDs zu platzieren, wurden sie auf der Papierform von Hand eingezeichnet, um sehen zu können, wo wie viele LEDs hinmüssen.

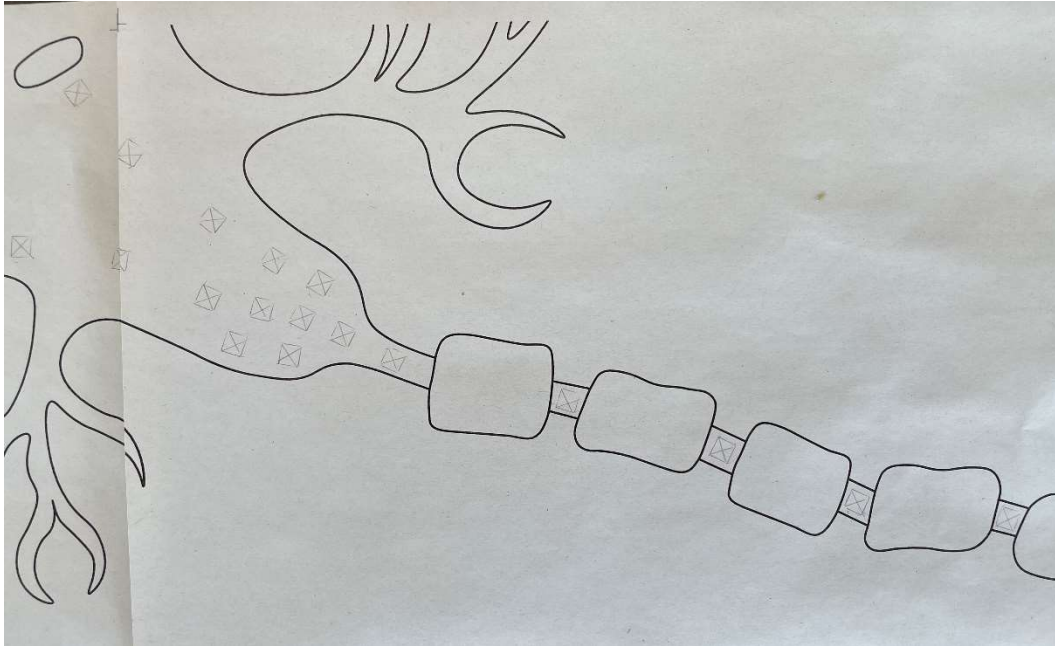


Abbildung 17: Von Hand eingezeichnete LEDs (LED-Grösse: 5x5 mm)

Dabei musste beachtet werden, dass der leuchtende Teil des LEDs 5mm x 5mm gross ist, dass darunterliegende Neopixel aber einen Durchmesser von fast 11 mm hat (Abbildung 20). Somit können die LEDs am Axonhügel nicht beliebig nahe aneinandergesetzt werden, da sowohl das Neopixel Platz braucht aber auch die Kabel einen gewissen Platz benötigen. So, dass man sie noch löten kann. Der Entwurf, auf dem alle Positionen für die LEDs von Hand eingezeichnet waren, wurde dann zu Hanspeter Strebel gebracht.

Mit der Idee Kosten und Zeit für die Mitarbeiter von Limec Solutions zu sparen, wurden zusätzlich alle LEDs als Quadrat mit einem darin liegenden Kreuz auf Adobe Illustrator eingezeichnet.

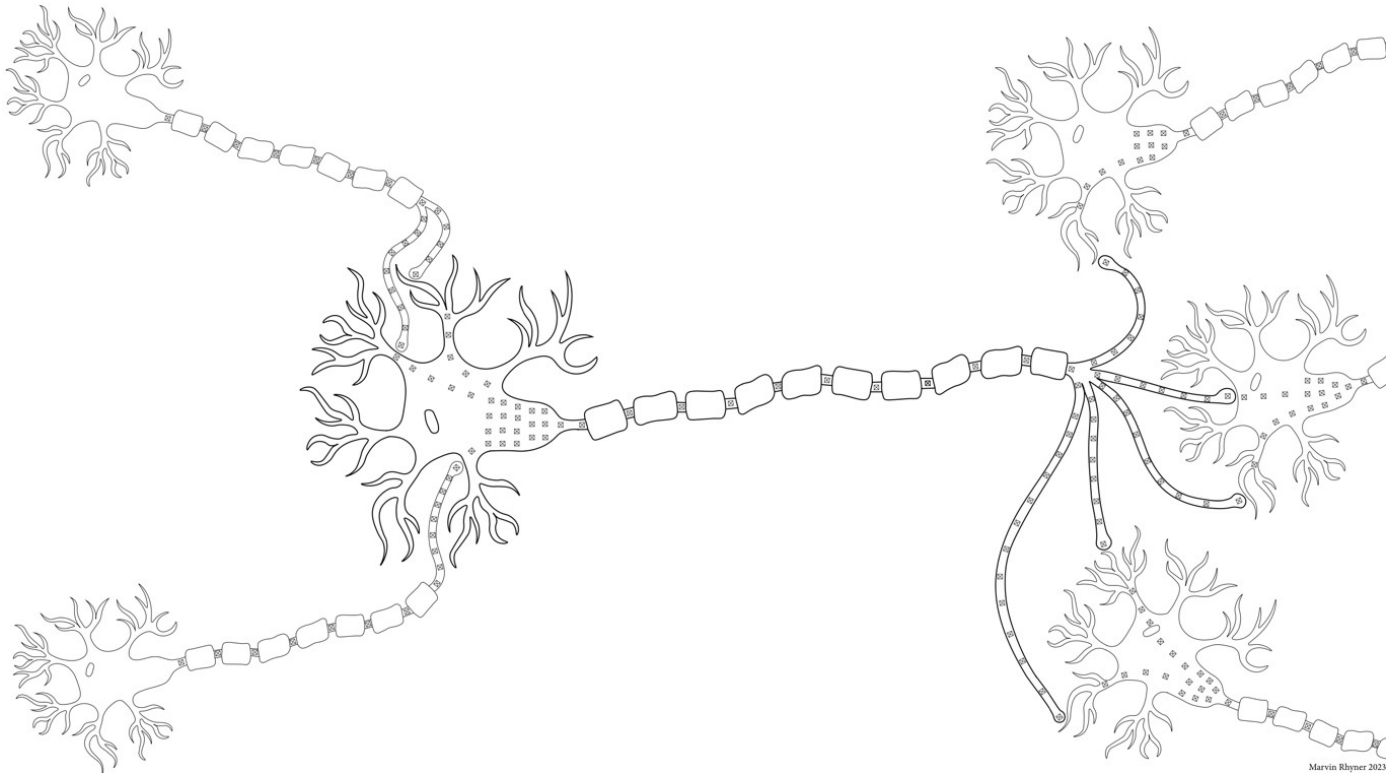


Abbildung 18: Auf Adobe Illustrator gezeichnete Nervenzelle mit eingezeichneten LEDs

Danach wurden nochmals letzte Feinheiten angepasst, sodass auch die Löcher für die Druckknöpfe für die Ansteuerung der LEDs bereits eingezeichnet sind. Das darüber eingezeichnete Loch für ein LED stellt später den Status des Druckknopfes dar. Ist der Druckknopf gedrückt, leuchtet das zugehörige LED. Ebenfalls wurde die „Andockstelle“ des synaptischen Endköpfchens der Nervenzelle unten links leicht verändert, sodass die Diffusionsstrecke zum Axonhügel ebenso lang ist wie die des oberen Neurons. Der abgebildete Entwurf entspricht auch dem finalen Entwurf, welcher auf dem Modell sichtbar ist.

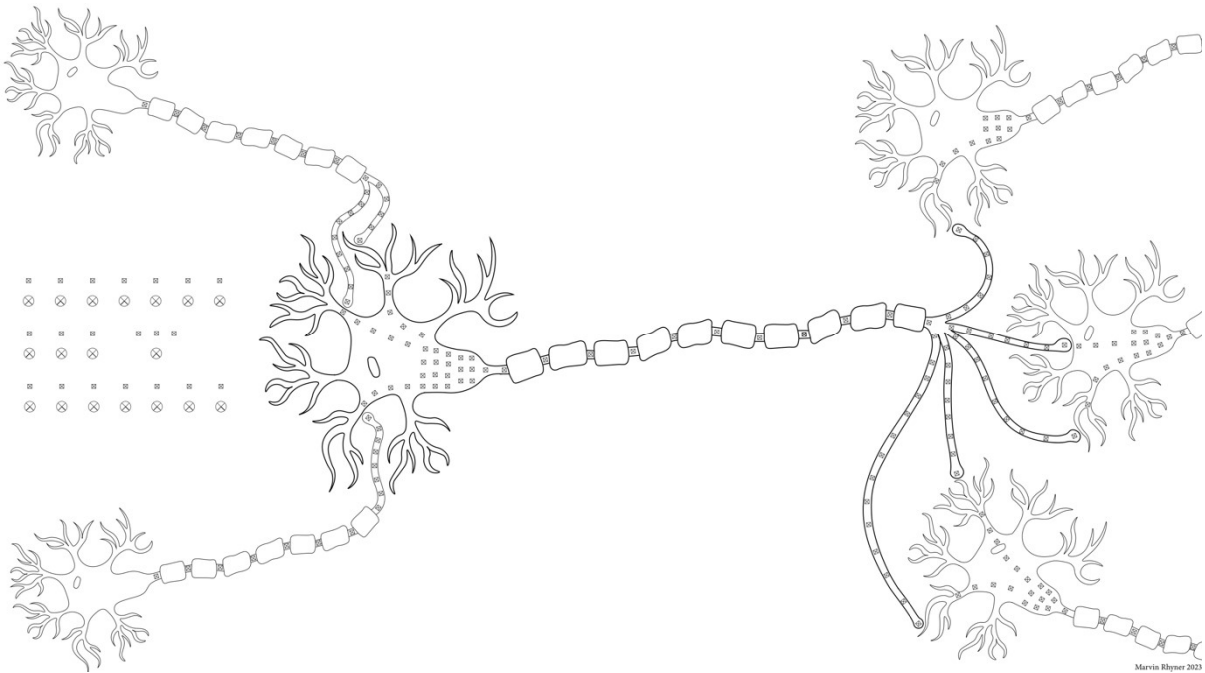


Abbildung 19: Finales Interface mit allen LEDs und Druckknöpfen

Nachdem der Entwurf fertig war, wurde er als .ai und .pdf File Hanspeter Strebel übergeben, welcher sich um die komplette Verarbeitung kümmerte. Aufgrund von Konvertierungsschwierigkeiten auf das Laserprogramm wurde die Datei im Nachhinein zusätzlich als .dxf File exportiert. Trotzdem war es nicht möglich, meine Zeichnung direkt in das Laserprogramm einzufügen und ein Mitarbeiter der Firma Limec Solutions musste alle LEDs und Druckknöpfe auf ihrem Programm nachtragen. Das gezeichnete File sollte auf eine silberne Aluminiumplatte gelasert werden und mit schwarz graviert werden.

4.2 Auswählen der LEDs

Für dieses Projekt ist es grundlegend, dass jede LED einzeln ansteuerbar ist und eine eigene Farbe darstellen kann. Dies unterscheidet sie von konventionellen LEDs insofern, da diese sonst in Reihe geschaltet sind und alle LEDs immer die gleiche Farbe in der gleichen Helligkeit darstellen. Ohne einen integrierten Schaltkreis ist es nicht möglich, gleichzeitig verschiedene Farben in unterschiedlichen Helligkeiten auf einem Strip darstellen zu können. Für dieses Modell ist dies aber grundlegend. Auch wäre es nicht möglich, beispielsweise ein Lauflicht zu programmieren, da alle LEDs bei einem normal LED-Strip entweder an oder aus sind. Für einzeln adressierbare LEDs gibt es verschiedene Optionen. Die bekannteste ist eine LED mit der Bezeichnung Ws2812b. Eine serielle Datenleitung überträgt dabei alle Daten an die LEDs, wo ein Mikrocontroller Chip die Daten liest und sichtbar macht. Dafür hat die LED eine Lötstelle, an welcher alle LEDs miteinander verbunden sind. Jede LED hat die 3 Farbsegmente rot, grün und blau (RGB), daraus können über 16 Millionen Farben in 256 Helligkeitsstufen dargestellt werden. Die LED-Farben werden in Zahlen geschrieben, jedes Farbsegment kann mit einer Helligkeit in einem Wertebereich von 0-255 leuchten, d.h. Wenn das rote Segment mit 255, das grüne mit 0 und das blaue ebenfalls mit 0 angegeben wird, leuchtet die LED mit voller Stärke rot. Wenn aber beispielsweise rot auf 205 grün auf 101 und blau auf 0 ist, leuchtet die LED orange. Im Internet gibt es dafür Farbkreise, welche Farben in Zahlen darstellen. Wenn alle Werte auf 255 sind, leuchtet die LED weiss. Diese Aufteilung ist später für die Stromversorgung von wichtiger Bedeutung. Leuchten alle 3 Segmente auf der Helligkeitsstufe 255, verbraucht sie am meisten Strom. Wenn die LED mit maximaler Helligkeit leuchtet, werden 60 mA Strom verbraucht. Wenn nur eines der drei Segmente leuchtet, wird auch nur ein Drittel, also 20mA Strom verbraucht.

Die LED müssen mit einer Spannung von mindestens 3.5 bis 5V versorgt werden,

3



Abbildung 20: Abbildung einer Ws2812b LED mit dem darunterliegenden Neopixel

³ <https://www.bastelgarage.ch/neopixel-ws2812b-rgb-led?search=ws2812b> (09.09.2023)

4.3 LEDs zusammenlöten

Die Ws2812b sind in einzelner Form gekauft worden. Ansonsten wäre es nicht möglich, die LEDs den Nervenzellen entsprechend zu platzieren, da diese viele Biegungen haben. Dies hat den Nachteil, dass alle LEDs von Hand aneinander gelötet werden müssen. Jede LED hat 6 Stellen, an welchen sie gelötet werden muss. 204 LEDs wurden verbaut, folglich musste nur für die LEDs über 1200-mal gelötet werden. Für das Modell wurden zur Sicherheit und als Ersatzteillager 245 LEDs bestellt⁴. Um die LEDs aneinander zu löten, werden sie in Pfeilrichtung aneinandergelegt. An der gnd⁵ stelle werden alle LEDs in einer Reihe aneinander gelötet, sie dient als „Minus“ Leitung des LEDs. Über die Din und Dout stelle sind alle LEDs miteinander verbunden.

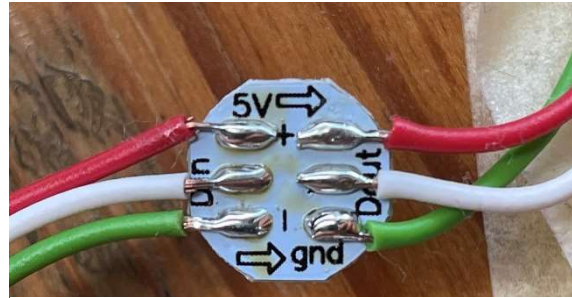


Abbildung 21: Gelötete LED mit sichtbaren Lötstellen

Über sie findet die Datenübertragung statt, sodass jedes LED weiss, was sie anzeigen muss. An der 5V Stelle wird die Spannungsversorgung sichergestellt. In meinem Modell ist das Kabel für gnd grün, für Din und Dout weiss und für die Stromversorgung rot.

Um nicht zu viel Zeit untätig zu verlieren, während die Platte produziert wird, wurden 140 LEDs mit einer Lizenlänge von etwa 7cm zusammengelötet, bevor die Platte fertig war. Diese wurde so hingelegt, dass zwischen den LEDs immer eine Schlaufe gebildet wurde, wie in Abbildung 22 sichtbar ist. Mit einer Lizenlänge von 7cm war gewiss, dass egal in welchem Abstand die LEDs dann tatsächlich



Abbildung 22: Ausschnitt der vorbereiteten LED-Kette. Schlaufensystem sichtbar

auf der Platte sind ich genug Kabel habe, um die LEDs näher oder weiter auseinander in die vorgesehenen Löcher einzusetzen. So konnte ich bereits anfangen zu programmieren und an den LEDs beobachten, was ich programmiert habe, ohne die Metallplatte zu haben. Ein Problem, dass bei diesem System trotzdem entstand, war folgendes: Da der Abstand zwischen den LEDs am Axonhügel zu klein ist um dem Kabel spiel zu lassen, konnten diese LEDs nicht

⁴ <https://www.bastelgarage.ch/> (19.05.23)

⁵ ground

vorbereitet werden. Diese konnte ich erst in dem Moment vorbereiten, als ich eine erste Platte mit den Löchern hatte. Dann habe ich die LEDs in die Löcher eingesetzt, die Kabellänge abgemessen und dann zusammengelötet.



Abbildung 23: Nah zusammengelötete LEDs für den Axonhügel

4.4 Welcher Mikrocomputer und erste Programmiererfahrungen

Alle LEDs benötigen einen externen Controller, über den sie gesteuert werden. Je nach Anforderungen ist dieser unterschiedlich komplex. Für dieses Modell muss ein Controller selbst programmiert werden, da er sehr spezifische Aufgaben hat. Um einen Controller selbst zu programmieren, gibt es mehrere Optionen, eine der bekanntesten ist ein Mikrocomputer zu verwenden. Da mein Bruder aus eigenen Projekten bereits einen Raspberry Pi (ein Mikrocomputer) zuhause hatte, war es naheliegend, es mit diesem zu versuchen. Ein Raspberry Pi ist einer der bekanntesten und vielfältigsten Mikrocomputer für eigene Heimprojekte. Ein grosser Vorteil des Raspberry Pi's ist die vielfältige Anwendung und die vielen Anschlussmöglichkeiten. Dieser wurde mit einem Breadboard und einem LED verkabelt, um erste Erfahrungen im Programmieren mit LEDs zu sammeln. Dieser Versuchsaufbau ist auf Abbildung 24 sichtbar. Ausserdem wurde so getestet, ob ein Raspberry sich für dieses Projekt eignet. Nachdem dies ein Erfolg war, war klar, dass ein Raspberry Pi der Controller für dieses Projekt wird. Da dieser Raspberry Pi jedoch einen Wackelkontakt hatte, ist das Programm mehrmals abgestürzt. Deshalb musste relativ bald ein neuer her, was sich aber aufgrund der aktuellen Situation mit dem

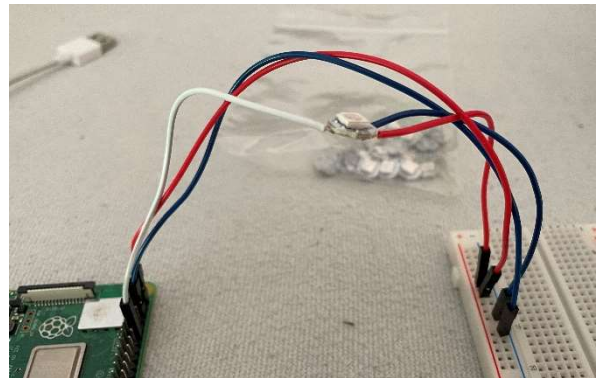


Abbildung 24: Verkabelung der ersten LED

Russland Ukraine Krieg als schwierig erwies. Entweder war der Mikrocomputer ausverkauft, nicht lieferbar oder horrend teuer. Schlussendlich hatte Amazon genau das richtige Produkt für dieses Projekt. Darin enthalten war ein Starterkit mit einem Raspberry Pi 4 Modell B und 4Gb RAM, dazu geliefert wird ein passendes Gehäuse mit einem Kühlsystem, eine 32Gb Mikro Sd Karte, ein Netzteil und ein HDMI-Kabel zu Mikro HDMI Anschluss⁶.

Der Raspberry Pi wird mit einer Spannung von 5V betrieben und verbraucht 3 Ampere Strom. Am GPIO-Output, an dem die LEDs angeschlossen werden, aber nur eine Ausgangsspannung von 3.5 Volt. Dies war für die Verkabelung wichtig zu wissen.

⁶ <https://www.amazon.de/Raspberry-Beumons-Starterkit> (05.06.23)

4.5 Mikrocomputer verkabeln und Stromversorgung

Für eine ausreichende Stromversorgung wurde folgende Rechnung gemacht:

Es werden 204 LEDs mit einem Stromverbrauch von maximal 60 mA verbaut. Das bedeutet, dass im Extremfall 12.24 Ampere verbraucht werden könnten. Der Stromverbrauch ist auch abhängig, welche Farbe dargestellt werden soll. Jede LED des Typs WS2812b wie in Kp 4.2 beschrieben, besteht intern aus 3 LED (eine interne LED rot, eine interne LED grün und eine interne LED blau). Jede interne LED hat einen Stromverbrauch von 20mA. Das heisst, wenn die LED in voller Stärke grün (Wert 255) leuchtet, werden 20mA benötigt. Weisses Licht benötigt am meisten Strom, weil dann alle drei internen LED mit voller Stärke betrieben werden. Da in diesem Modell aber nur etwa die Hälfte der LEDs gleichzeitig läuft und jeweils nur ein Farbsegment leuchten muss (das heisst nur 1/3 des max Stromverbrauchs pro LED), kann gerade etwa mit einem Drittel des maximalen Stromverbrauchs gerechnet werden. Damit ist man bei 2.04 Ampere. Um aber jedes Risiko für eine Überlastung in der Stromversorgung zu minimieren, wird ein Netzteil für die LEDs verwendet, welches eine Spannung von 5V und 10 Ampere liefert. Der Raspberry wird zusätzlich über ein separates Netzteil mit 5V Spannung und 3 Ampere versorgt. Da der GPIO-Output des Raspberry Pi eine Ausgangsspannung von 3.3 Volt hat, die Ws2812b LEDs aber mit 5V versorgt werden müssen, muss am Breadboard ein Levelshifter verbaut werden. Dieser wandelt die Ausgangsspannung von 3.3 Volt in eine 5V Spannung um. In diesem Modell wird dafür ein 74AHCT125⁷ als Levelshifter verwendet.

Für einen Testaufbau verwendet man für die Verkabelung von elektrischen Schaltungen ein Breadboard. Dieses ist in Spalten und Reihen aufgeteilt, welche miteinander verbunden sind. Über das Breadboard ist der Raspberry mit den LEDs und der Stromversorgung verbunden.

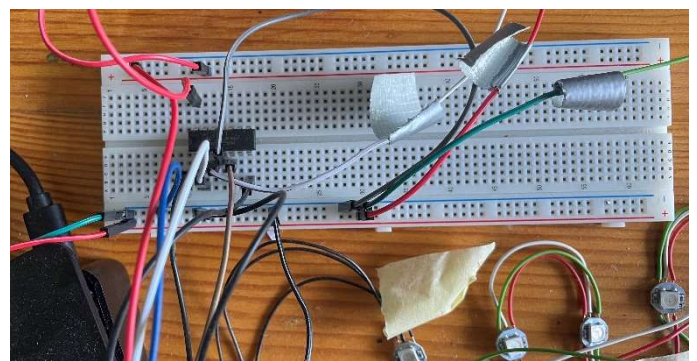
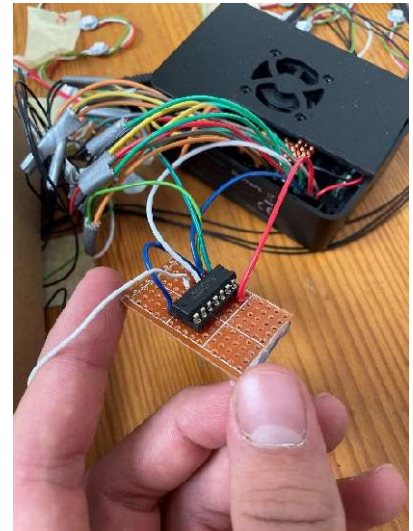


Abbildung 25: Verkabeltes Breadboard

⁷ <https://www.amazon.de/Adafruit-74AHCT125-Quad-Level-Shifter> (03.06.23)

Für die Verkabelung der fertigen Version wurde ein IC Sockel benutzt. Damit ist sichergestellt, dass die Kabel zum Raspberry und den LEDs sich nicht lösen können. Dies trägt zur Robustheit des Modells weiter bei und ist deutlich platzsparender und sicherer wie eine Verkabelung über ein Breadboard. Der ganze IC-Sockel wurde dann mit dem Levelshifter auf eine Platine gelötet damit die Beinchen des Sockels geschützt sind und die Kabel sauber befestigt sind.



*Abbildung 26: Verkabelung mit IC Sockel
welcher auf eine Platine gelötet ist*

Der 5V Ausgang des Netzgerätes wird mit einem Kabel direkt mit der LED 0 an der 5V Stelle verbunden. Das ground Kabel des Netzteils wird sowohl mit der ground Stelle der LED 0 als auch der Stelle 1 und 7 des IC-Sockels verbunden. Vom Raspberry aus führt der Pin 06 ebenfalls zu der ground Stelle der LED 0. Der Pin 12, (GPIO des Raspberry), führt beim IC-Sockel zum Pin 2

Von der LED aus führt ein Kabel direkt zum Pin 3 auf dem IC-Sockel.⁸ Damit wird die Stromversorgung und Datenleitung von den LEDs zum Raspberry und zu der Stromquelle sichergestellt. Dieser Schaltplan wurde mithilfe des unter Fusszeile 8 markierten YouTube Videos nachgebaut.

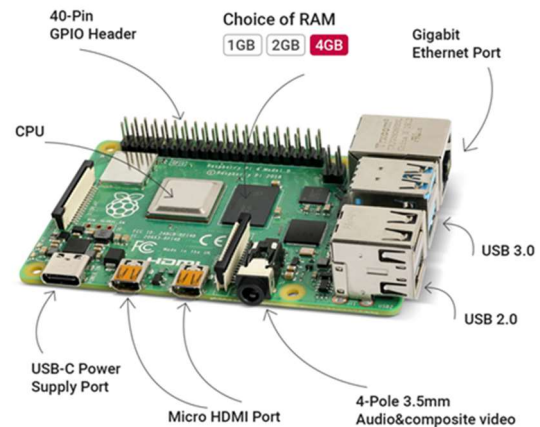


Abbildung 27: Aufbau & Beschriftung Raspberry

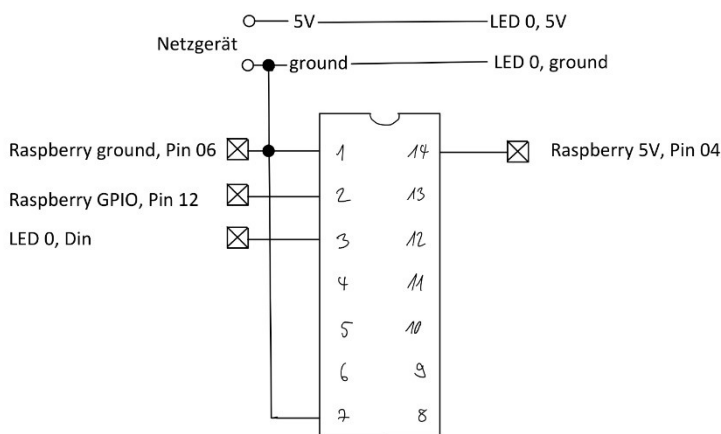


Abbildung 28: Elektronischer Schaltplan für den IC-Sockel

PIN	NAME		NAME	PIN
01	3.3V DC Power		5V DC Power	02
03	GPIO02 (SDA1, I ² C)		5V DC Power	04
05	GPIO03 (SDL1, I ² C)		Ground	06
07	GPIO04 (GPCLK0)		GPIO14 (TXD0, UART)	08
09	Ground		GPIO15 (RXD0, UART)	10
11	GPIO17		GPIO18 (PWM0)	12
13	GPIO27		Ground	14
15	GPIO22		GPIO23	16
17	3.3V DC Power		GPIO24	18
19	GPIO10 (SP10_MOSI)		Ground	20
21	GPIO09 (SP10_MISO)		GPIO25	22
23	GPIO11 (SP10_CLK)		GPIO08 (SPI0_CE0_N)	24
25	Ground		GPIO07 (SPI0_CE1_N)	26
27	GPIO00 (SDA0, I ² C)		GPIO01 (SCL0, I ² C)	28
29	GPIO05		Ground	30
31	GPIO06		GPIO12 (PWM0)	32
33	GPIO13 (PWM1)		Ground	34
35	GPIO19		GPIO16	36
37	GPIO26		GPIO20	38
39	Ground		GPIO21	40

Abbildung 29: Anschlüsse des Rasperrys

⁸ <https://www.youtube.com/watch?v=kVFnEXX-YUE&t=961s> (05.10.23)

4.6 Druckknöpfe für das Modell aussuchen und zusammenlöten

Die Idee stufenlose Potentiometer als Steuerung zu verwenden, wäre sehr ästhetisch und funktional, ist in der Umsetzung aber hoch komplex. Dasselbe gilt für eine Steuerung über das Smartphone oder einen Computer. Um das Modell möglichst benutzerfreundlich ansteuern zu können, werden direkt auf die Aluplatte Druckknöpfe montiert. Dafür haben die Druckknöpfe ein Gewinde, mit welchem sie mit einer Mutter an der Platte festgeschraubt werden können. Jeder Druckknopf hat genau eine Funktion, welche später im Kapitel Anleitung erklärt wird. Unter den Druckknöpfen werden LEDs eingefügt, welche den Status des Druckknopfes anzeigen. Die Druckknöpfe sind alle in einer Reihe aneinander gelötet, sodass alle mit 5V Strom versorgt werden. Gleichzeitig geht von jedem Druckknopf ein Kabel zu einem GPIO-Ausgang am Raspberry Pi, über welchen der Druckknopf adressiert und angesteuert wird. Wie man auf der Abbildung 31 sehen kann, hat jeder Druckknopf 3 Lötstellen. Zwei für die Stromversorgung und eine weitere für die Verbindung zum Raspberry. Da die Druckknöpfe aber erst zusammengelötet werden können, wenn sie in die Platte eingesetzt sind, wurden sie zuerst auf einem Karton als Zwischenlösung befestigt. Die Druckknöpfe sind von den Farben und der Anordnung so gewählt, dass sie möglichst selbsterklärend sind. Die obere und untere Reihe Knöpfe dient für den Input an den Nervenzellen, die mittlere Reihe ist für die Spezialfunktionen zuständig.



Abbildung 30: Anordnung und Abbildung der Druckknöpfe

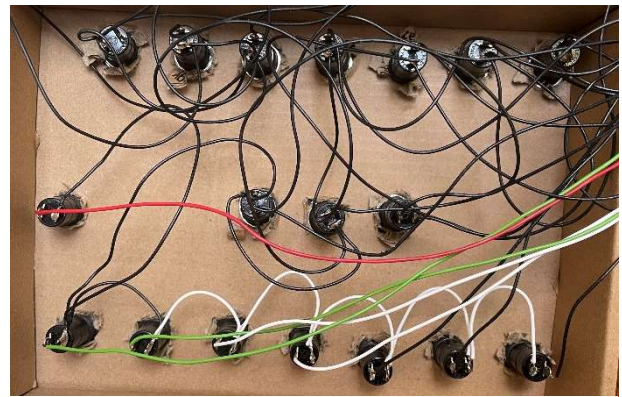


Abbildung 31: Verkabelung der Druckknöpfe

4.7 Rahmen, Schutz und Halterung konstruieren

Die Platte ist mit 3mm Dicke massiv und hält einigem stand. Zudem schützt die Eloxatschicht die Frontplatte sehr gut vor Beschädigungen und Abnutzung. Vielmehr ist es wichtig, die Rückseite, also den Raspberry selbst und die Elektronik vor Schlägen und äusseren Einflüssen zu schützen. Wenn man die Frontplatte ohne die Rückplatte hinlegen würde, läge das gesamte Gewicht auf den LEDs und dem Raspberry da diese direkt an der Rückseite der Frontplatte befestigt sind. Um ein hochwertiger Schutz für die Elektronik zu machen, muss eine Abdeckung (Rückplatte) konstruiert werden. Dafür ist auf SolidWorks (ein CAD-Programm) eine Rückplatte konkret für dieses Modell gezeichnet worden. Diese wurde von der Firma eMDe Blechfabrik genau nach der CAD-Zeichnung so gebogen und gelasert das sie mit leichtem Versatz auf die Frontplatte passt. Darin enthalten sind zudem Lüftungsschlitze, sodass das Modell gut gekühlt werden kann. Die Rückplatte hat mehrere Vorteile. Sie gibt dem Modell Stabilität, schützt die Elektronik und führt zu einer deutlichen Aufwertung des Gesamteindrucks. Mit Schrauben und Muttern wird die Rückplatte direkt mit der Frontplatte verschraubt. Um das Modell gut transportieren zu können, ist an der Oberseite der Rückplatte ein Tragegurt befestigt. Dieser ist mit zwei Unterlagscheiben festgeschraubt. Das Modell lässt sich so einfach um die Schulter hängen oder von Hand tragen.



Abbildung 34: Montierte Tragegurte für das Modell

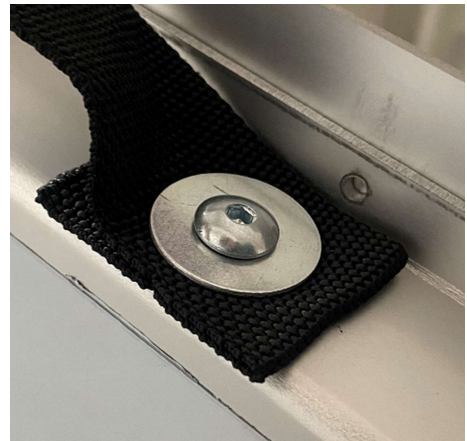


Abbildung 33: Befestigung der Tragegurte

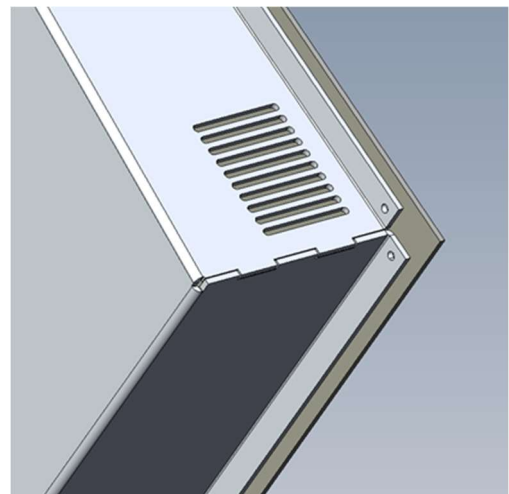


Abbildung 32: Nahaufnahme der Rückplatte mit sichtbarem Versatz zur Vorderplatte

Um das Modell stabil aufstellen zu können, sind an der Rückplatte zwei Winkel befestigt, mit welchen das Modell ohne Hilfe stehen kann. Dadurch das die Frontplatte leicht versetzt auf die Rückplatte geschraubt ist, steht das Modell nur auf den äussersten Punkten der Winkel und vorne auf der Kante. Dadurch stehen die Winkel immer unter Spannung und das Modell kann ohne Fremdeinwirkung nicht vornüberkippen. Da die Winkel fix sind, hat dies den Nachteil, dass das Modell sich nicht mehr so platzsparend versorgen lässt.



Abbildung 35: Fertig montierte Rückplatte

4.8 Chronologische Zusammenführung der Komponenten

Zu Beginn wurden die Anforderungen für das Modell mit Johannes Kottonau festgelegt. Daraufhin hat der Prozess der Entwürfe für das Interface begonnen. Der elektronische Anfang wurde mit einer einzelnen LED gemacht, die über das Breadboard an den bereits aufgesetzten Raspberry Pi meines Bruders angeschlossen wurde. Diese LED sollte die Brauchbarkeit eines Raspberry Pi für dieses Projekt zeigen. Danach wurde eine erste Kette von 15 LEDs zusammengelötet, um ein Lauflicht zu programmieren. Dieses entspricht gerade etwa der Länge der ersten Nervenzelle. Nachdem diese Tests erfolgreich waren, wurde ein eigener Raspberry Pi beschafft und aufgesetzt. Dem Strip wurden wieder einige LED hinzugefügt, welche erstens verschieden schnelle Lauflichter darstellen konnten und nach einer gewissen Anzahl LEDs die Farbe gewechselt haben. Dieses modulare Prinzip wurde dann immer weiter ausgebaut.

Zuerst wurde die entsprechende Funktion programmiert, dann wurden wieder weitere LEDs angelötet. Damit die LED-Kette übersichtlich bleibt, wurden die LEDs ungefähr da auf einem Tisch platziert wo sie später auch im Modell zu sehen sind. Mit Klebeband wurden alle LEDs nummeriert und befestigt. Dadurch hat sich das Modell laufend

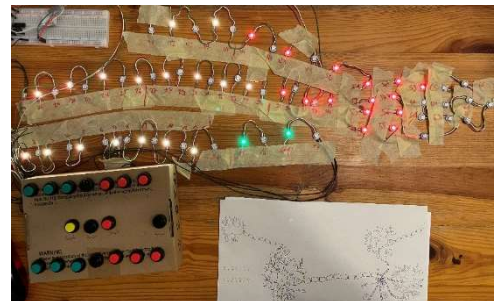


Abbildung 36: Funktionierende Lichterkette mit Druckknöpfen

weiterentwickelt und die entstandenen Fehler konnten bereits während dem Programmieren erkannt und behoben werden. Währenddessen kamen auch die Druckknöpfe hinzu. Durch die Ansteuerung über Druckknöpfe konnten nun auch erste Versuche gemacht werden, den Raspberry ohne Desktop aufzustarten und zu benutzen. Dieser Prozess zieht sich so weiter, bis alle LEDs aneinander gelötet waren. Ein Problem, welches entstanden ist, ist die Platte. Dadurch, dass ein Industrielaser benutzt wird, können damit die Löcher ohne Problem gemacht werden, bei den Gravuren kommt der Laser jedoch an seine Grenzen. Dies hatte zur Folge, dass das Design auf einer silbernen Platte kaum erkennbar ist, und für Unterrichtszwecke untauglich ist. Um dieses Problem zu beheben, wurden verschiedene



Abbildung 37: Misslungener Versuch die silberne Platte nachzumalen

Lösungsansätze ausprobiert. Der erste Versuch, in die entstandene Rille Farbe einzufüllen und

dann abzuziehen hat nicht funktioniert. Mit einem schwarzen Stift nachzumalen hat ebenfalls nicht funktioniert, da dies zu unpräzisen Resultaten ergibt. Fazit war, dass Nachmalen egal auf welche Art auf einer silbernen Platte nicht funktioniert.

Die Möglichkeit, welche am vielversprechendsten war, war eine schwarz eloxierte Platte zu verwenden und dann silbern zu gravieren. Somit wird der Kontrast erhöht und die Gravur sollte besser sichtbar sein. Das Bestellen einer zweiten Platte hat aber viel Zeit gekostet und den erstellten Zeitplan unbrauchbar gemacht. Die schwarze Platte hatte trotzdem zu wenig Kontrast – mussten mit einem Edding 750 die Konturen nachgezogen werden. Da dieser Stift eine besonders hohe Deckkraft auf dunklen Oberflächen hat, hat dies gut funktioniert. Mithilfe der silbernen Platte und dem bereits angekommenen Schutzgehäuse konnte davor bereits ein Rohbau gemacht werden, bis die schwarze Platte verfügbar war. So musste nur noch die Platte gewechselt und die Elektronik eingebaut werden. So konnte alles vorbereitet werden, sodass der Umbau auf die finale schwarze Platte möglichst schnell und reibungslos verläuft.

Um die LEDs auf der Platte zu befestigen, mussten mehrere Dinge beachtet werden. Einerseits sollte gewährleistet werden, dass die LEDs auch definitiv in den vorgesehenen Löchern bleiben und halten. Andererseits ist Aluminium ein sehr guter Stromleiter. Wenn also ein LED beschädigt wäre oder eine der Lötstellen mit der Platte in Berührung kommt, gibt es einen Kurzschluss. Um diesem Problem zu entgehen, ist die Platte eloxiert. Zusätzlich ist die Platte entlang der LEDs mit doppelseitigem Klebeband abgeklebt, so halten einerseits die LEDs und gleichzeitig ist eine isolierende Schicht zwischen LED und Aluplatte.

Um den LEDs noch mehr Stabilität zu geben, sind sie entlang der Kabel mit Panzertape auf der Platte befestigt.

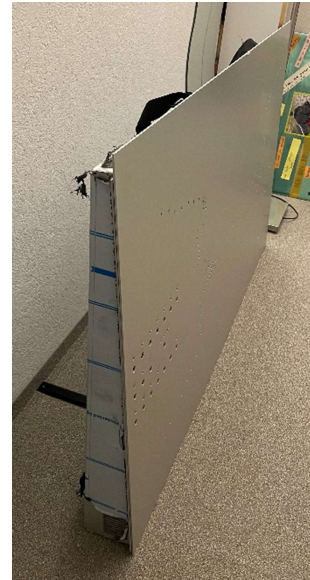


Abbildung 39: Fertiger Rohbau der gesamten Konstruktion mit der silbernen Frontplatte



Abbildung 38: Fertig zusammengebautes und nachgezeichnetes Model auf der schwarzen Platte



Abbildung 40: Aufgestelltes, fertiges laufendes Modell

4.9 Finanzierung und Zeitaufwand

Da dieses Modell ein hohen Materialaufwand für eine Maturaarbeit hat und das Modell der Kantonsschule Frauenfeld übergeben wird, wird sie auch von der Kantonsschule finanziert. Dafür existiert seit kurzem der Emil Halter Fond, welcher zur Finanzierung von naturwissenschaftlichen Projekten und Anschaffungen dient.

Produkt:	Preis pro Stück:	total:
1 x Raspberry Pi 4 Modell B	199.99 Euro	199.99 Euro
1 x DC-Stecker & Buchse	5.79 Euro	5.79 Euro
1 x Netzteil 5V 10A	16.80 Euro	16.80 Euro
1 x Levelshifter	5.97 Euro	5.97 Euro
245 x Neopixel Ws2812b	0.90 Franken	227.41 Franken
3 x Schaltlitze	13.50 Franken	40.50 Franken
1 x Elektronik Lot	9.95 Franken	9.95 Franken
3 x Lötpitze 20W	2.95 Franken	8.85 Franken
1 x Lötpitze 15W	3.95 Franken	3.95 Franken
1 x Abisolierzange	22.95 Franken	22.95 Franken
1 x Kabelbinder	1.50 Franken	1.50 Franken
2 x Kotflügelscheiben	0.20 Franken	0.40 Franken
10 x Div. Schrauben & Muttern	0.17 Franken	1.70 Franken
2 x Winkel	5.95 Franken	11.90 Franken
1 x Balkenschuh	3.15 Franken	3.15 Franken

1 x Filzgleiter	2.60 Franken	2.60 Franken
1 x Panzertape	10.40 Franken	10.40 Franken
2 x Doppelseitiges Klebeband	22.95 Franken	43.9 Franken
1 x Tragegurt	1.75 Franken/Meter	2.45 Franken
1 x Frontplatte		500 bis 800 Franken ⁹
31 x Druckknopf	1.58 Franken	48.99 Franken
1 x Isolierband	4.95 Franken	4.95 Franken
Div. Schrauben & Muttern	x	8.35 Franken
1 x Rückplatte	512.79 Franken	512.79 Franken
1 x Platine	10.50 Franken	10.50 Franken

Somit hat das Modell 228.55 Euro und 1477.19 bis 1777.19 Franken gekostet
gesamt macht das 1693.45 bis 1993.45 Franken ¹⁰

⁹ Der Preis für die Frontplatte ist zum Zeitpunkt der schriftlichen Abgabe aus oben genanntem
Verzögerungsgrund noch nicht definitiv bekannt.

¹⁰ Alle Rechnungen sind im Anhang eingefügt.

5 Software

Im Kapitel Software ist der Code und die Entstehung des Codes genau beschrieben und erklärt.

5.1 Erstellen einer Programmierumgebung

Um den Raspberry Pi programmieren zu können, muss er zuerst aufgesetzt werden. Dafür kann man auf der Website [Raspberrypi.org](https://www.raspberrypi.org) entsprechende Images herunterladen. In diesem Fall habe ich das Image „Raspberry Pi OS with desktop“ Manuel heruntergeladen. In der heruntergeladene zip Datei ist eine .img datei enthalten, welche mit der Win32Diskmanger Applikation als .img Datei geöffnet und auf die SD-Karte geladen wird. Die SD-Karte kann danach aus dem PC entfernt und in den Raspberry Pi eingesetzt werden. Wenn man nun den Raspberry Pi an Tastatur, Maus und Monitor anschliesst kann der Raspberry aufgestartet werden und es wird die heruntergeladene Benutzeroberfläche geöffnet. Nun werden einige Benutzereinstellung vorgenommen, unter anderem die Verbindung mit einem Netzwerk. Um nun den LED-Strip ansteuern zu können, ist auf der Benutzeroberfläche bereits ein Python Editor installiert. Die Programmiersprache, mit welcher dieses Modell geschrieben ist, ist dementsprechend Python. Zu Python gehört ein pip¹¹ über das später einfach Bibliotheken nachinstalliert werden können. Um erste Erfahrungen mit dem Programmieren von LEDs zu sammeln, wurde die Beispiele des Sourcecode aus der installierten Bibliothek verwendet. Darin sind fertig programmierte Codes enthalten, welche einzeln ansteuerbare LEDs leuchten lassen. Einer dieser Codes hat den Funktionstest der LEDs dargestellt, mit dem kontrolliert wurde ob alle LEDs ordnungsgemäss funktionieren. Somit konnte später sichergestellt werden, dass wenn ein LED etwas Falsches oder Unerwartetes anzeigt, der Fehler in meinem Code zu finden ist und nicht aufgrund von kaputten oder falsch gelöteten LEDs ist. Mit einigen Änderungen an einem der Codes habe ich auch erste Programmiererfahrungen gesammelt und meine erste LED zum Leuchten gebracht. Später konnte mit dieser Basis mein eigener Code geschrieben werden.¹² Das unter Fusszeile 11 vermerkte YouTube Video hat einen grossen Teil des mir angeeigneten Grundwissen zum Ansteuern und Programmieren von LEDs beigetragen.

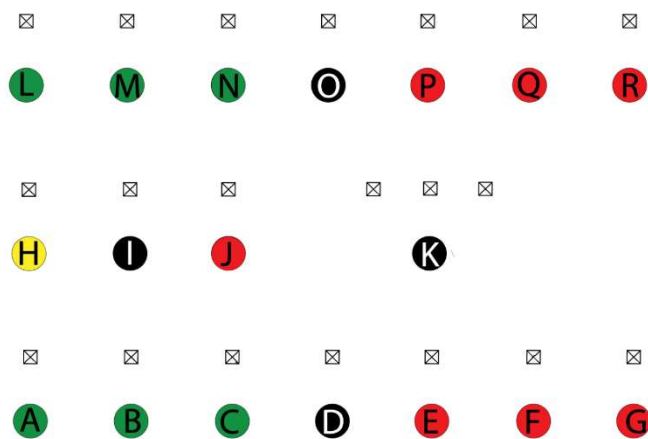
¹¹ Packet Installations Programm

¹² <https://www.youtube.com/watch?v=kVFnEXX-YUE&t=961s> (05.10.23)

5.2 Kernelemente des Codes

Der gesamte Code ist über 1000 Zeilen lang und wird nicht direkt erklärt, dies würde den Rahmen der Maturaarbeit sprengen. Bestimmt hätte man den Code kürzer oder einfacher schreiben können. Basierend auf meinen Kenntnissen war es einfacher, ausführlicher zu sein. Aus Geheimhaltungsgründen ist der Code nicht in dieser Maturaarbeit oder im Anhang einsehbar. Der Code liegt archiviert bei Johannes Kottonau und kann auf Absprache eingesehen werden. Um verständlich zu machen, wie der Code funktioniert, ist er in ein Flussdiagramm umgeschrieben. Speziell an diesem Flussdiagramm ist, dass es nicht direkt ein Ende gibt. Läuft das Modell einmal, wird es immer weiterlaufen. Es ist beispielhaft eingefügt, wie die Tasten Reset, Pause, Play und Speed funktionieren könnten. Diese Tasten sind aber so programmiert, dass sie jederzeit, während das Modell läuft, gedrückt werden können. Daher lassen sie sich nicht definitiv in ein Flussdiagramm integrieren, da sie sonst bei jedem Schritt eingefügt sein müssten. Der Prozess der Tasten Reset, Pause, Play und Speed ist in einem separaten Flussdiagramm geschrieben. Speziell an diesem Modell ist auch, dass alle LEDs nummeriert sind. Dies ist grundlegend, damit das Modell interaktiv sein kann und Berechnungen mit Variablen gemacht werden können. Dafür wurde die LEDs im Code mithilfe von Arrays nummeriert. Die Nummerierung für die LEDs und für die Tasten ist in der Abbildung 39 & 40 zu sehen. Um das Flussdiagramm zu verstehen, werden diese Abbildungen zwingend benötigt. Der Code wurde mit so vielen Variablen wie möglich geschrieben, dadurch können einfach Änderungen vorgenommen werden, wenn Abstände, Farben oder Geschwindigkeiten angepasst werden müssten.

Druckknöpfe für Nervenzelle 2



Druckknöpfe für Nervenzelle 1

Abbildung 41: Beschriftete Druckknöpfe

5.2.1 Legende Druckknöpfe:

- A: Starker hemmender Impuls für Nervenzelle 1
- B: Mittlerer hemmender Impuls für Nervenzelle 1
- C: Schwacher hemmender Impuls für Nervenzelle 1
- D: Neutraler Impuls für Nervenzelle 1
- E: Schwacher stimulierender Impuls für Nervenzelle 1
- F: Mittlerer stimulierender Impuls für Nervenzelle 1
- G: Starker stimulierender Impuls für Nervenzelle 1
- H: Reset Taste
- I: Pause Taste
- J: Play Taste
- K: Speed Taste
- L: Starker hemmender Impuls für Nervenzelle 2
- M: Mittlerer hemmender Impuls für Nervenzelle 2
- N: Schwacher hemmender Impuls für Nervenzelle 2
- O: Neutraler Impuls für Nervenzelle 2
- P: Schwacher stimulierender Impuls für Nervenzelle 2
- Q: Mittlerer stimulierender Impuls für Nervenzelle 2
- R: Starker stimulierender Impuls für Nervenzelle 2

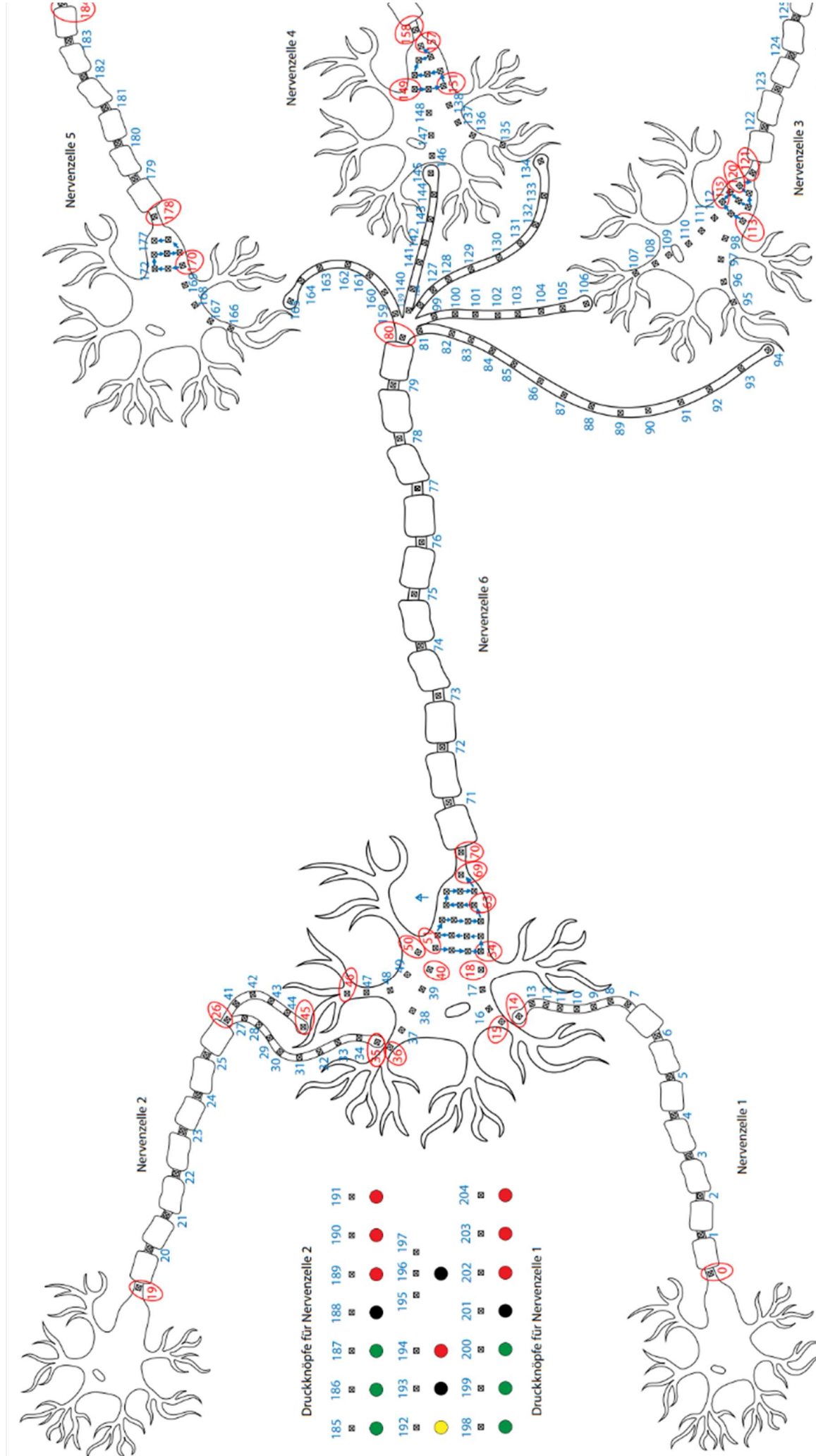


Abbildung 42: Nummerierte LED-Zeichnung
Maturaarbeit

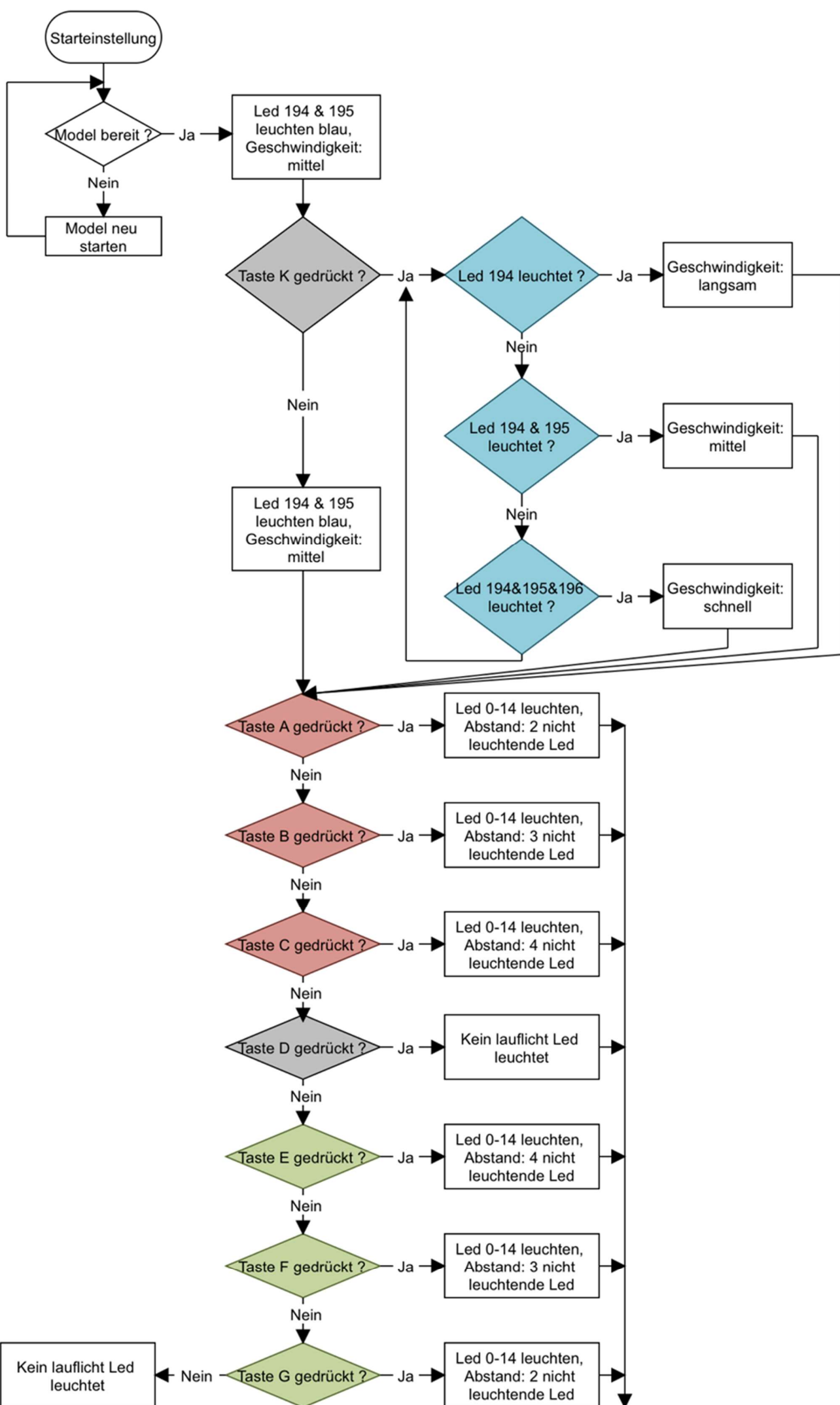


Abbildung 43: Flussdiagramm Part 1

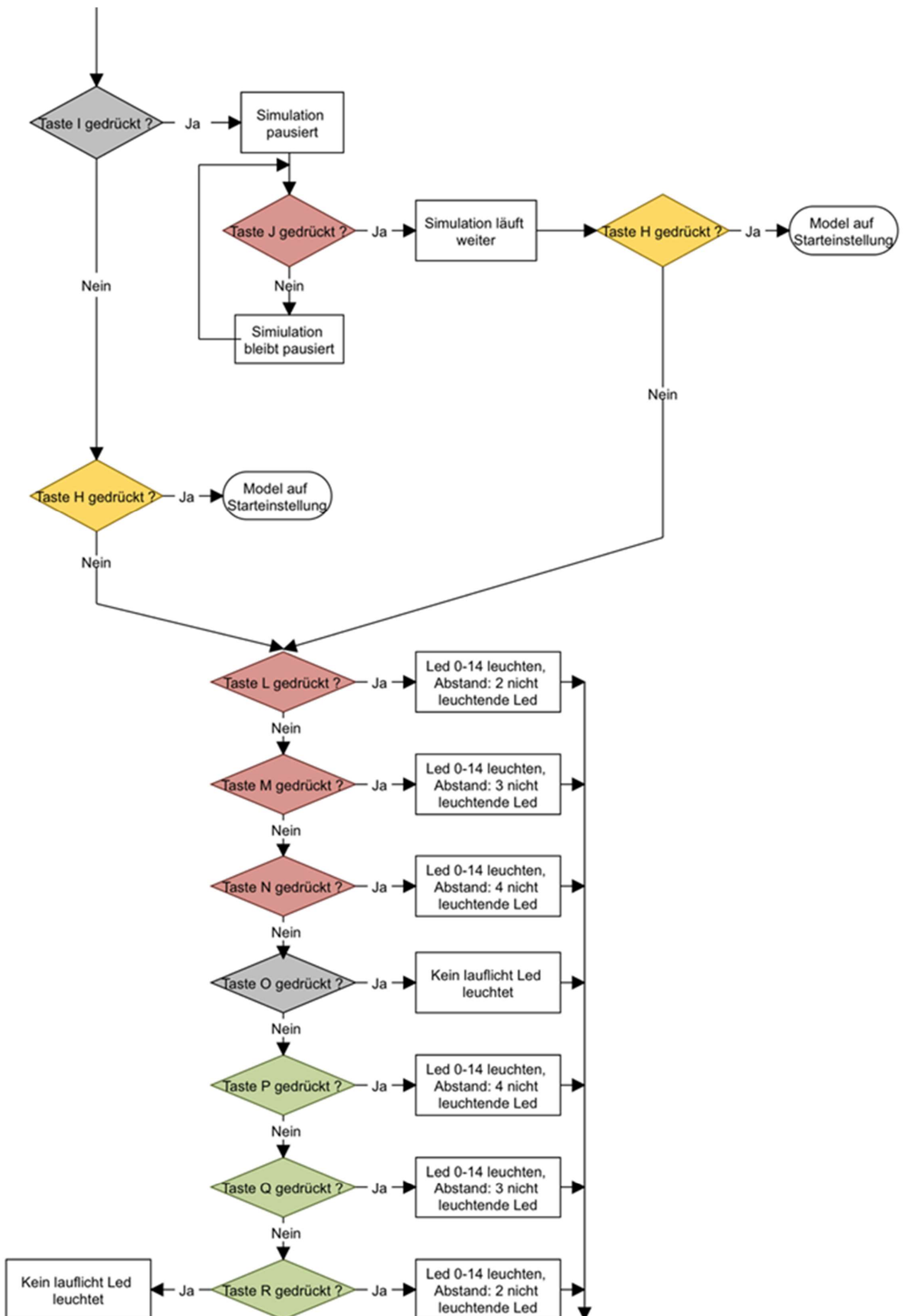


Abbildung 44: Flussdiagramm Part 2

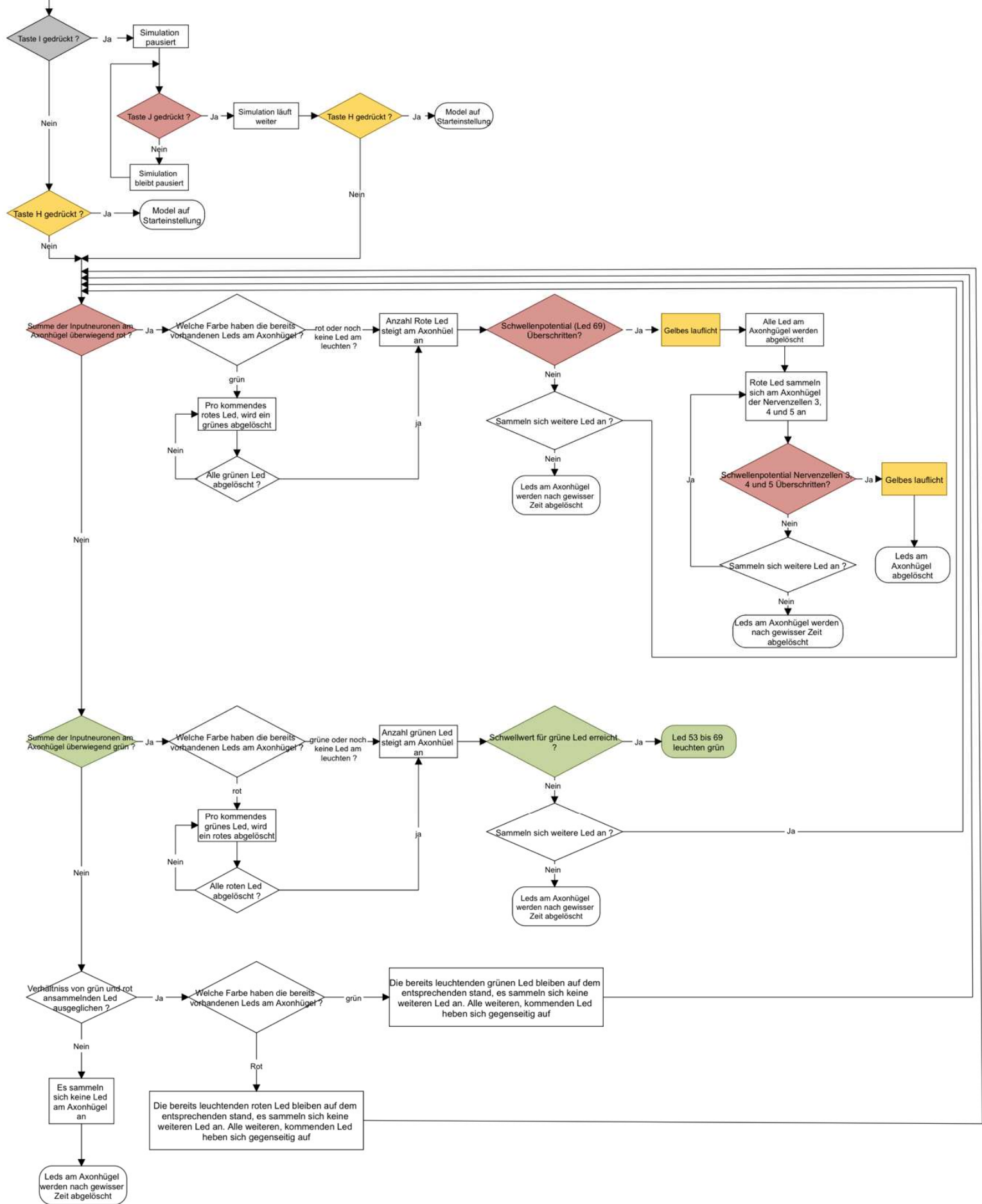


Abbildung 45: Flussdiagramm Part 3

¹⁴ Der Code ist bei Johannes Kottonau archiviert und nach Absprache einsehbar

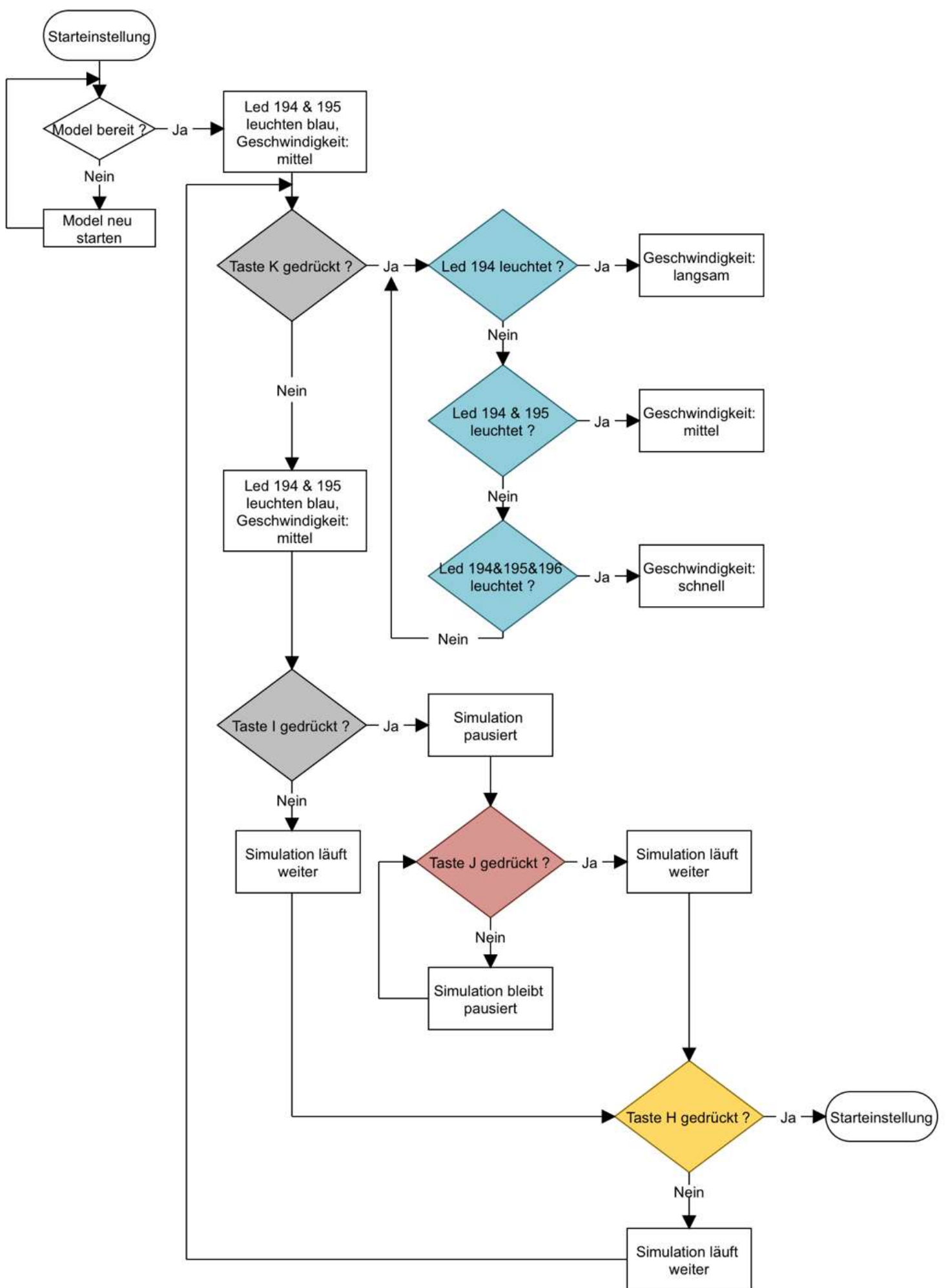


Abbildung 46: Flussdiagramm Spezialtasten Druckknöpfe

6 Verifikation und Diskussion

Im Kapitel 6 wird das Model auf seine Alltagstauglichkeit geprüft und untersucht

6.1 Funktionstests und Robustheit

Das Modell ist für eine möglichst hohe Robustheit aus qualitativ hochwertigen Materialien gemacht. Die Frontplatte und die Rückplatte ergeben zusammen eine sehr robuste und widerstandsfähige Konstruktion. Der verwendete Mikrocomputer ist einer der bekanntesten und häufigsten gekauften Mikrocomputer auf dem Markt. Eine der grössten Schwachstellen jedes Computers bei intensiver Nutzung ist der Prozessor, welcher überhitzen kann. Da der Mikrocomputer mit einem Case ausgestattet ist, in welches ein Kühlsystem integriert hat, wird der Raspberry während der Benutzung durchgehend ausreichend gekühlt. Zudem schützt das Case vor Verschmutzung, Schlägen oder Beschädigungen. Eine Schwachstelle des Raspberry ist die Verkabelung, vor allem das USB-C Kabel sollte nicht ein und ausgesteckt werden. Dadurch kann ein Wackelkontakt entstehen, welcher den Raspberry funktionsuntauglich macht. Die heikle Elektronik ist deshalb im inneren des Modells und das Modell kann nur über eine Steckdose aktiviert oder deaktiviert werden. Die Druckknöpfe sind fest mit der Platte verbunden und stehen nicht stark ab. Sie sind dafür ausgelegt, in häufigem Gebrauch zu sein, ohne sich schnell abzunutzen. Die LEDs versprechen ebenfalls eine hohe Qualität, könnten aber im Fall eines Schadens ersetzt werden, genauso wie die Druckknöpfe auch. Die Qualität der Lötstellen wurde zwei Mal kontrolliert und mit einem anschliessenden Funktionstest bestätigt. Nichtsdestotrotz ist das Modell mit Vorsicht zu behandeln. Das Modell ist trotz allen Massnahmen weder staub- noch wasserfest. Während der Entwicklung des gesamten Modells wurden laufend Funktionstest gemacht. Jedes Led wurde mit einem zweiten Code auf ihre Funktion getestet. Auch die Druckknöpfe wurden während dem Programmieren getestet. Durch die häufige Benutzung können aber Fehlerquellen entstehen, die bis dato noch nicht bekannt sind.

6.2 Grenzen des Modells

Dem Modell sind aus unterschiedlichen Gründen Grenzen gesetzt. Das Modell ist eine Vereinfachung der Realität und entspricht nicht exakt dem, wie das menschliche Nervensystem funktioniert oder aussieht. Das Design ist möglichst optimiert, um eine bestmögliche Hilfe im Unterricht darzustellen, ersetzt aber nicht die Notwendigkeit von weiteren Abbildungen und Erklärungen. Zudem ist das Modell ohne Vorwissen und anschliessende Vertiefungen nutzlos. Eine weitere Grenze liegt in der Darstellung, ist der Axonhügel. Sowohl die hemmenden als auch die stimulierenden Ionen werden immer in der gleichen Reihenfolge aufsummiert oder abgebaut. In der Realität findet aufgrund der Brown'schen Teilchenbewegung eine deutlich grössere Durchmischung statt, welche keiner Reihenfolge folgt.

Eine weitere Grenze ist, dass die Neurotransmitter einer menschlichen Nervenzelle stufenlos funktionieren und bedeutend schneller sind als im Modell dargestellt. Ausserdem ist das Modell nicht unzerstörbar, bei nicht sachgemässer oder unvorsichtiger Anwendung kann das Modell Schaden nehmen. Zudem sind das Gewicht und die Grösse des Modells vor und Nachteil. Einerseits ist das Modell dadurch sehr stabil, braucht aber auch viel Platz. Eine weitere Schwäche ist die Geschwindigkeit beim aufstarten. Das ist systembedingt durch den Mikrocontroller.

7 Benutzeranleitung und Anwendungsbeispiele

Im Kapitel 7 wird erklärt wie das Model richtig und sicher zu benutzen ist um das Model möglichst lang nutzen zu können

7.1 Benutzeranleitung und Tastenbedienung

In Unterkapitel 7.1 wird erklärt wie genau das Model zu benutzen ist und wie die Tastenanwendung funktioniert.

7.1.1 Transport und Lagerung

- Das Modell muss trocken an einem trockenen und Platz gelagert werden.
- Während das Modell nicht benutzt wird, ist die Stromversorgung zu trennen.
- Der Transport findet ausschliesslich an der dafür vorgesehenen Halterung statt.
- Das Modell wird zu Präsentationszwecken auf die Standfüsse gestellt.

7.1.2 Installation und Aktivierung des Modells

- Beide Stecker müssen in der Steckleiste sein.
- Das Modell wird eingeschalten, wenn der Stecker der Steckleiste in eine 230V Steckdose eingesteckt ist und der Kippschalter der Steckleiste auf «On» ist.

- Alle LED leuchten nach 30 Sekunden pink auf.
- Die Speed Taste leuchtet auf Stufe 2 und die Tasten D und O leuchten pink
 - Das Modell ist nun einsatzbereit
-

7.1.3 Tastenbedienung

Das Modell ist bereit, wenn alle LED pink aufgeleuchtet haben und die Speed Status leuchten auf 2 sind. Zudem steht das Modell auf den Tasten D und O und ist somit im neutralen Modus. Ist die Pausentaste gedrückt, können ebenfalls Wechsel des Inputs vorgenommen werden, sollte das Modell nun weiterlaufen muss dies mit Play bestätigt werden.

Für einen Wechsel der Geschwindigkeit muss die Speed Taste gedrückt gehalten werden. Ein Wechsel der Anzahl leuchtenden LEDs bestätigt die Veränderung. Wenn die richtige Geschwindigkeit erreicht ist, kann die Taste

Losgelassen werden. Ausser im Pausenmodus löscht die Reset Taste jederzeit alle LED ab.

Die aufgeführte Legende beschreibt, welche Taste welche Funktion hat. Mit einfachem, massvollem Drücken kann die jeweilige Taste aktiviert werden. Wenn ein neuer Input gezeigt werden soll, muss einfach eine neue Taste gedrückt werden. Eine kurze Unterbrechung der Simulation bestätigt den Wechsel der Interaktion.

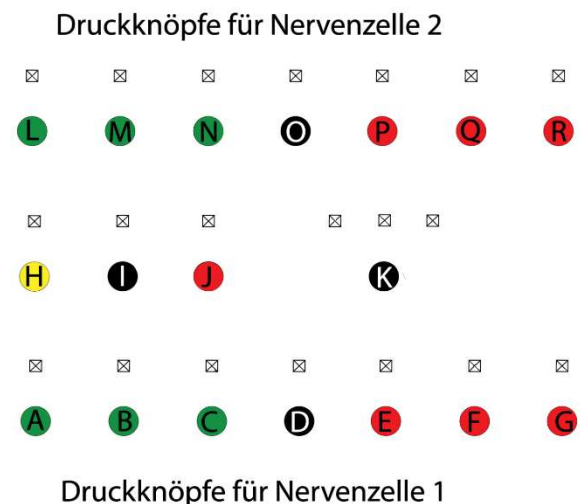


Abbildung 47: Legende Druckknöpfe

- A: Starker hemmender Impuls für Nervenzelle 1
- B: Mittlerer hemmender Impuls für Nervenzelle 1
- C: Schwacher hemmender Impuls für Nervenzelle 1
- D: Neutraler Impuls für Nervenzelle 1
- E: Schwacher stimulierender Impuls für Nervenzelle 1
- F: Mittlerer stimulierender Impuls für Nervenzelle 1
- G: Starker stimulierender Impuls für Nervenzelle 1
- H: Reset Taste
- I: Pause Taste
- J: Play Taste

- K: Speed Taste
 - L: Starker hemmender Impuls für Nervenzelle 2
 - M: Mittlerer hemmender Impuls für Nervenzelle 2
 - N: Schwacher hemmender Impuls für Nervenzelle 2
 - O: Neutraler Impuls für Nervenzelle 2
 - P: Schwacher stimulierender Impuls für Nervenzelle 2
 - Q: Mittlerer stimulierender Impuls für Nervenzelle 2
 - R: Starker stimulierender Impuls für Nervenzelle 2
-
- Die Pause Taste stoppt das Modell jederzeit, während dieser Zeit können Veränderungen des Inputs vorgenommen werden. Es kann in der Zeit, während das Modell pausiert ist kein Reset gemacht werden.
 - Die Play Taste aktiviert die Simulation danach wieder.
 - Über die Speed Taste kann die gesamte Geschwindigkeit des Modells je nach Bedarf in drei verschiedene Stufen eingestellt werden.
 - Die Tasten A bis G und L bis R dienen zur Darstellung verschiedener Ausgangssituationen für die Reizleitung

7.1.4 Deaktivierung des Modells

- Kippschalter der Steckleiste auf «Off»
- Steckleiste aus der Stockdose ziehen
- Modell versorgen

7.2 Typische Use Cases für den Unterricht

Die in Unterkapitel 7.2 beispielhaft aufgeführten Use-Cases wurden in enger Zusammenarbeit mit meiner Biologielehrperson ausgearbeitet. Es gibt sehr viele Use-Cases, davon sind jedoch nur einige wenige aufgeführt die nicht zwingen so ausgeführt werden müssen wie beschrieben.

7.2.1 Case 1

1. Speed ist auf Stufe 2
2. Man stellt beim oberen Inputneuron (Nervenzelle 2) "Stärke 2/3 stimulierend" ein.
3. Man stellt beim unteren Inputneuron (Nervenzelle 1) "Stärke 0/3 neutral" ein.
4. Am Axonhügel akkumulieren langsam Na-Ionen bis Schwellenpot. überschritten, Nervenimpuls wird losgeschickt, wieder Ruhepot. am Axonhügel.
5. Man erhöht schrittweise am unteren Inputneuron (Nervenzelle 1), die Stärke auf 1/3 hemmend, dann auf 2/3 hemmend und schliesslich auf 3/3 hemmend.
6. Bei 3/3 hemmend unten (kombiniert mit immer noch 2/3 stimulierend oben), ist dann nahezu vollständige Neutralisation am Axonhügel.
7. Dann könnte man oben zurückfahren auf 1/3 stimulierend, und man hat die perfekte Neutralisation.

7.2.2 Case 2

1. Speed ist auf Stufe 2
2. Man stellt am oberen Inputneuron (Nervenzelle 2) „Stärke 3/3 stimulierend“ ein.
3. Man stellt am unteren Inputneuron (Nervenzelle 1) „Stärke 2/3 stimulierend“ ein.
4. Am Axonhügel akkumulieren sich relativ schnell Na-Ionen und es werden mit einer hohen Frequenz Nervenimpuls losgeschickt.
5. Man reduziert am oberen Inputneuron (Nervenzelle 2) auf „Stärke 1/3 stimulierend“.
6. Es werden weniger Nervenimpuls am Axonhügel losgeschickt.
7. Man stellt am oberen Inputneuron (Nervenzelle 2) „Stärke 2/3 hemmend“ ein.
8. Angesammelte Na-Ionen werden abgebaut, K-Ionen werden angesammelt.
9. Die Schwelle für K-Ionen wird erreicht.

7.2.3 Case 3

1. Zur Einführung des Themas wird die Speed Stufe auf 1 gestellt.
2. Man stellt am untere Inputneuron (Nervenzelle 1) „Stärke 2/3 stimulierend“ ein.
3. Na-Ionen werden am Axonhügel angesammelt.
4. Das Modell wird kurz vor Erreichen des Schwellenpotenzials pausiert.
5. Der Lehrer kann erklären, dass nun das Schwellenpotenzial fast erreicht ist und dass nun ein Nervenimpuls folgt.
6. Die Simulation kann weiter abgespielt werden.
7. Das Nervenimpuls wird losgeschickt.
8. An den Nervenzelle 3, 4 und 5 werden ebenfalls Na-Ionen angesammelt bis das Nervenimpuls wieder losgeschickt wird und sich weitere Na-Ionen ansammeln.

7.2.4 Case 4

1. Zu Einführung des Themas wird die Speed Stufe auf 1 gestellt.
2. Man stellt am untere Inputneuron (Nervenzelle 1) „Stärke 2/3 hemmend“ ein.
3. K-Ionen werden am Axonhügel angesammelt.
4. Die angesammelten K-Ionen erreichen die Schwelle.
5. Der Lehrer kann erklären wieso kein Nervenimpuls losgeschickt wird und wo Unterschiede von hemmend und stimulierend ist.

7.2.5 Case 5

1. Zu Showzwecken wird Speed auf Stufe 3 gestellt.
2. Man stellt bei Inputneuron oben und unten (Nervenzelle 1 & 2) „Stärke 2/3 stimulierend“
3. Na-Ionen werden sehr schnell angesammelt.
4. In einer hohen Frequenz werden Nervenimpulse losgeschickt.
5. An den Nervenzelle 3, 4 und 5 werden ebenfalls Na-Ionen angesammelt bis der Nervenimpuls wieder losgeschickt wird und sich weitere Na-Ionen ansammeln.
6. Es wird dargestellt, wieso im Hirn ein stärkeres Signal ankommt.

7.2.6 Case 6

1. Speed auf Stufe 2
2. Man stellt das untere Inputneuron (Nervenzelle 1) auf „Stärke 3/3 stimulierend“ ein.
3. Man stellt das obere Inputneuron (Nervenzelle 2) auf „Stärke 1/3 hemmend“ ein.
4. Am Axonhügel stellt sich ein Gleichgewicht ein und es wird kein Nervenimpuls losgeschickt.

7.2.7 Case 7

1. Speed auf Stufe 2.
2. Man stellt das untere Inputneuron (Nervenzelle 1) auf „Stärke 3/3 stimulierend“ ein.
3. Man stellt das obere Inputneuron (Nervenzelle 2) auf „Stärke 1/3 hemmend“ ein.
4. Am Axonhügel stellt sich ein Gleichgewicht ein und es wird kein AP losgeschickt.
5. Man reduziert das untere Inputneuron (Nervenzelle 1) auf „Stärke 2/3 stimulierend“ ein.
6. Es werden mehr K-Ionen am Axonhügel angesammelt, bis die Schwelle erreicht ist.
7. Kein Nervenimpuls wird losgeschickt.

7.2.8 Case 8

1. Speed auf Stufe 2
2. Man Stellt das obere Inputneuron (Nervenzelle 2) auf „Stärke 2/3 stimulierend“ ein.
3. Es werden Na-Ionen angesammelt, bis ein Nervenimpuls losgeschickt wird.
4. Man wartet ab bis 2 oder 3 Nervenimpulse losgeschickt wurden.
5. Man Stellt das obere Inputneuron (Nervenzelle 2) auf „Stärke neutral“ ein.
6. Nach einer gewissen Zeit werden die angesammelten Na-Ionen am Axonhügel von Nervenzelle 6 abgelöscht.
7. Nach einer gewissen Zeit werden auch die angesammelten Na-Ionen am Axonhügel von Nervenzelle 3, 4 und 5 abgelöscht.

7.2.9 Case 9

1. Speed auf Stufe 2
2. Man Stellt das untere Inputneuron (Nervenzelle 1) auf „Stärke 1/3 stimulierend“ ein.
3. Es werden Na-Ionen angesammelt, bis ein Nervenimpuls losgeschickt wird.
4. Man wartet ab bis 2 oder 3 Nervenimpulse losgeschickt wurden.
5. Man stellt das untere Inputneuron (Nervenzelle 1) auf „Stärke 3/3 stimulierend“ ein.
6. Man stellt das obere Inputneuron (Nervenzelle 2) auf „Stärke 1/3 hemmend“ ein.
7. An der Nervenzelle 6 stellt sich ein Gleichgewicht ein und es werden keine Nervenimpulse mehr losgeschickt.
8. Nach einer gewissen Zeit werden auch die angesammelten Na-Ionen am Axonhügel von Nervenzelle 3, 4 und 5 abgelöscht.

7.2.10 Case 10

1. Man stellt am unteren Inputneuron (Nervenzelle 1) die „Stärke 2/3 stimulierend“ ein.
2. Es werden Na-Ionen angesammelt, bis einige Nervenimpulse losgeschickt wurden.
3. Man stellt nun die obere Nervenzelle auf „Stärke 2/3 stimulierend“ ein.
4. Die untere Nervenzelle wird auf „Stärke 3/3 hemmend“ eingestellt.
5. Die Na-Ionen sammeln sich nur äusserst langsam an.
6. Die Na-Ionen sammeln sich an der Nervenzelle 6 so langsam an, dass die angesammelt Na-Ionen an den Nervenzelle 3, 4 und 5 abgelöscht werden, bevor ein Nervenimpuls an der Nervenzelle 6 losgeschickt wird.
7. Fazit die Reizleitung wird unterbrochen.

7.3 Wartung / Updates / Programmiermöglichkeiten

Das Modell ist ein Selbstläufer, ist es in Betrieb müssen keine Änderungen mehr vorgenommen werden. Bevor die Rückplatte jedoch endgültig mit der Frontplatte verschraubt wird, können letzte Änderungen am Code vorgenommen werden. Dafür ist ein letztes Treffen mit Herrn Kottonau nötig, sodass er das Modell nach seinen Vorstellungen konfigurieren kann. Da der Mikrocomputer autonom funktioniert und nicht mit dem Wlan verbunden ist, müssen auch keine Updates oder Systemanpassungen vorgenommen werden. Wenn etwas am Modell geändert werden muss, wird es zuerst aufgeschraubt. Dann wird ein Monitor und eine Tastatur angeschlossen, über welche die Änderung getätigt werden kann. Neue Funktionen lassen sich nur schwer dazu programmieren da die Platte und LEDs sehr spezifisch auf die Funktionen zugeschnitten sind. Somit fallen grundsätzlich weder Wartungen noch Updates an.

Das Modell kann mit einem trockenen Tuch abgestaubt werden, sollte aber nicht feucht gereinigt werden. Wenn am Modell etwas kaputt gehen sollte, sind Ersatzteile bereits vorhanden. Auch vom Code existiert ein Backup, sodass sogar der Raspberry ersetzt werden könnte. Um die Langlebigkeit des Modells zu erhöhen, sollte das Modell wie im Kapitel 7.2. Anleitung und Tastenbedienung benutzt werden.

8 Zusammenfassung

Das Ziel, ein neues, verbessertes Modell zu erschaffen, welches im Schulunterricht den Schülern eine Hilfe sein sollte, besser und schneller zu verstehen, wie eine Reizleitung abläuft, wurde erfüllt. Ich konnte mich persönlich in vielen Bereichen weiterentwickeln und habe viele Lernprozesse gemacht. Diese Maturaarbeit beinhaltet verschiedenste Aspekte, welche leicht untergehen beim Betrachten des finalen Modells. In dieser Maturaarbeit wurde nicht nur ein Mikrocomputer programmiert, sondern auch ein Nerven Modell gezeichnet, eine Rückplatte konstruiert, unzählige LEDs zusammengelötet, ein theoretischer Hintergrund zur Bioelektrizität verfasst und unzählige Stunden mit Rückschlägen und Erfolgen verbracht. Das finale Modell ist eine 1500mm x 900mm grosse, schwarz eloxierte Aluminiumplatte auf der 6 Nervenzellen abgebildet sind. Über das gesamte Modell verteilen sich über 200 einzeln ansteuerbare LEDs, welche die Reizleitungen darstellen. Mit 18 Druckknöpfen, welche direkt auf der Platte befestigt sind, kann mit dem Modell auf verschiedenste Arten interagiert werden. Damit wird ein Spektrum von über 150 Variationen von verschiedenen Darstellungen geboten. Gesteuert wird das Modell über einen autonom laufenden Mikrocomputer, welcher selbst programmiert wurde. Im gesamten hat die Vollendung dieser Maturaarbeit über 200 Stunden Zeit gebraucht und über 1500 CHF gekostet. Das Modell ist ein voller Erfolg, hochwertige Materialien und ein überdurchschnittlicher Zeitaufwand versprechen eine hohe Langlebigkeit und top Qualität.

Somit können Schüler an der Kantonsschule Frauenfeld hoffentlich über Generationen hinweg davon profitieren.

9 Quellenverzeichnis

9.1 Litteraturverzeichnis

- International Journal of Science Education, 2012. Computer simulations to support science instruction and learning: A critical review of the literature, 9, 1337-1370
- Computers & Education, 2014, Effectiveness of virtual reality-based instruction on student's learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis, 70, 29-40
- Furtak, 2012, Experimental and Quasi-Experimental Studies of Inquiry-Based Science Teaching: A Meta-Analysis, 3, 300-329
- Physiologie ,2009, Neuronen: Zelluläre und vernetzende Eigenschaften,4, 408-412
- Arzneimittelwirkungen, 1996, Anatomische und physiologische Grundlagen, 7, 117-125

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: beschriftete Nervenzelle	5
Abbildung 2:Schematische Darstellung der Saltatorische Erregungsleitung entlang des Axons	6
Abbildung 3:Vorgänge an der Zellmembran während eines Aktionspotenzials.....	7
Abbildung 4:Signalübertragung an einer Synapse. Als Beispiel für einen Transmitter wurde hier Acetylcholin gewählt.	7
Abbildung 5:Zeitlicher Verlauf eines Aktionspotenzials.	9
Abbildung 6:Intensität der Stimulation. Je mehr Neurotransmitter in der Nervenzelle ankommen, desto mehr Nervenimpulse werden weitergeschickt. Der Pfeil ganz links zeigt auf die Menge an einströmenden Ionen am Axonhügel. Der mittlere und der rechte Pfeil zeigen die Konsequenz daraus, wie viele Nervenimpulse weitergeleitet werden.	9
Abbildung 7:Alles oder nichts Prinzip, wenn die Stimulation nicht ausreicht oder in einem zu grossen zeitlichen Abstand eintrifft, wird kein Nervenimpuls losgeschickt. Ist die Stimulation hingegen genug stark oder in ausreichend kurzem Zeitabstand, wird das Schwellenpotenzial erreicht und ein Nervenimpuls wird weitergeleitet.....	10
Abbildung 8:Skizze Grundidee.....	11
Abbildung 9:Skizze erste Nervenzelle.....	13
Abbildung 10:Skizze mit mehreren angeordneten Nervenzellen.....	14
Abbildung 11:erster Adobe Illustrator Entwurf.....	15
Abbildung 12:zweiter, verbesserter Adobe Illustrator Entwurf.....	16
Abbildung 13: dritter Adobe Illustrator Entwurf	17
Abbildung 14:vierter Adobe Illustrator Entwurf, Nahezu fertiger Entwurf, welcher dem Design des schlussendlichen Modells entspricht.	17
Abbildung 15: Erste ausgedruckte, zu kleine Version (4x5 A4 Blätter im Querformat).....	18
Abbildung 16 Passende ausgedruckte Version 1500mm x 900mm (5x6 A4 Papiere im Querformat) .	18
Abbildung 17:Von Hand eingezeichnete LEDs (LED-Grösse: 5x5 mm)	19
Abbildung 18: Auf Adobe Illustrator gezeichnete Nervenzelle mit eingezeichneten LEDs	20
Abbildung 19:Finales Interface mit allen LEDs und Druckknöpfen	21
Abbildung 20: Abbildung einer Ws2812b LED mit dem darunterliegenden Neopixel	22
Abbildung 21: Gelötete LED mit sichtbaren Lötstellen.....	23
Abbildung 22: Ausschnitt der vorbereiteten LED-Kette. Schlaufensystem sichtbar	23
Abbildung 23: Nah zusammengelötete LEDs für den Axonhügel	24
Abbildung 24:Verkabelung der ersten LED.....	25
Abbildung 25: Verkabeltes Breadboard.....	26
Abbildung 26:Verkabelung mit IC Sockel welcher auf eine Platine gelötet ist.....	27
Abbildung 27: Aufbau & Beschriftung Raspberry.....	28
Abbildung 28:Elektronischer Schaltplan für den IC-Sockel	28
Abbildung 29: Anschlüsse des Raspberrys	28

Abbildung 30: Anordnung und Abbildung der Druckknöpfe	29
Abbildung 31: Verkabelung der Druckknöpfe	29
Abbildung 32: Nahaufnahme der Rückplatte mit sichtbarem Versatz zur Vorderplatte	30
Abbildung 33: Befestigung der Tragegurte	30
Abbildung 34: Montierte Tragegurte für das Modell	30
Abbildung 35: Fertig montierte Rückplatte	31
Abbildung 36: Funktionierende Lichterkette mit Druckknöpfen	32
Abbildung 37: Misslungener Versuch die silberne Platte nachzumalen.....	32
Abbildung 38: Fertig zusammengebautes und nachgezeichnetes Model auf der schwarzen Platte	33
Abbildung 39: Fertiger Rohbau der gesamten Konstruktion mit der silbernen Frontplatte	33
Abbildung 40: Aufgestelltes, fertiges laufendes Modell.....	34
Abbildung 41: Beschriftete Druckknöpfe.....	38
Abbildung 42: Nummerierte LED-Zeichnung.....	39
Abbildung 43: Flussdiagramm Part 1.....	40
Abbildung 44: Flussdiagramm Part 2.....	41
Abbildung 45: Flussdiagramm Part 3.....	42
Abbildung 46: Flussdiagramm Spezialtasten Druckknöpfe	43
Abbildung 47: Legende Druckknöpfe	46

10 Anhang

10.1 Rechnungsbelege

Farnell **element14**

Ihre interne Auftragsnummer: 22.06.23 21:25 PM
Bestellt durch: STEFAN RHYNER
Farnell Kommissionsnr: 9535-1535
Farnell-Kundennummer: 831730

Seite: 1
Datum: 23 JUN 2023

EMPFANGSBESTÄTIGUNG IHRER BESTELLUNG
Das ist keine Rechnung

Rechnungsadresse: STEFAN RHYNER
BODENWIES 10
9535 WILEN
Schweizland

Lieferadresse: STEFAN RHYNER
BODENWIES 10
9535 WILEN

Farnell Bestellnr	RoHS konform	Bestellte Menge	Versandete Menge	Nachlieferung	Einheitspreis	Betrag	voraussichtliches Lieferdatum
2913863	Y10 3	3	0		0.965	2.90	23/06/2023
Produktbeschreibung: MCPS25B-5 DRUCKTASTER, SPST, 1A, 250V, GELB Hersteller-Teilenummer: MCPS25B-5							
2913862	Y10 9	9	0		1.000	9.00	23/06/2023
Produktbeschreibung: MCPS25B-3 DRUCKTASTER, SPST, 1A, 250V, ROT Hersteller-Teilenummer: MCPS25B-3							
2913864	Y10 5	5	0		0.965	4.83	23/06/2023
Produktbeschreibung: MCPS25B-2 DRUCKTASTER, SPST, 1A, 250V, SCHWARZ Hersteller-Teilenummer: MCPS25B-2							
2913865	Y10 9	9	0		0.965	8.69	23/06/2023
Produktbeschreibung: MCPS25B-6 DRUCKTASTER, SPST, 1A, 250V, GRÜN Hersteller-Teilenummer: MCPS25B-6							
1103845	YX10 5	5	0		0.415	2.08	23/06/2023
Produktbeschreibung: 2227MC-14-03-10-F1 IC-SOCKEL 14POLIG Hersteller-Teilenummer: 2227MC-14-03-10-F1							
						Warenwert	27.48
						FRACHT/FRET (< 50	18.00
						SAMEDAY DESPATCH	0.00
						MwSt	3.51
						Total	48.99 CHF

Farnell AG, c/o Centralis Switzerland GmbH, Bahnhofstrasse 10, 6300 Zug, Switzerland
www.farnell.ch

Farnell is a division of Premier Farnell UK Limited
Premier: 80-880-3, Bahnhofstrasse 10, 6300 Zug, CH, 6300, Zug 304 960-11, CH-163 861-133 MWSTVIA
Product Registration Number: WEEA0304872

Verkaufskundenservice
Yonker/Kundenbetreuung
T 044 204 84 84

Kundenservice
Service Agents/Vorster
T 044 204 84 84

Technische Beratung
Customer Support
T 044 204 84 84

emde **BLECHFABRIK**

LASERTEILE | BLECHTEILE | BAUGRUPPEN | GRAVUREN

Rechnung 15057791
Datum: 12.10.2023
U/Kundenauftrag: 12060965
Unser Zeichen: Marco Wüst
Telefon: +41 55 222 0 222
E-Mail: finanz@emde.ch
Telefon Buchhaltung: +41 55 222 02 16
Ihre Bestellung: #299899 / Backplate
Ihre Referenz: Janik Haas

P.P. CH-8722 Kaltbrunn **A-PRIORITY**

Janik Haas
Frechtstrasse 11
8371 Busswil

Pos	Artikel-Nr	Bezeichnung	Lieferung Nr.	Menge	Netto/ME	Total
10	3503572	231004.001 - Backplate	14063384	1	476.12	476.12
						CHF 476.12
Währung: Gesamtbeitrag inkl. Mwst						512.79
CHF						512.79

Zahlungsbedingung: 30 Tage Netto
Lieferbedingung: EXW - ab Werk, unverpackt
Versandart: AG - Abholung durch Kunde

MwSt-Nr: CHE-466.790.010/MWST
UID-Nr: CHE-466.790.010/HR

Bitte verwenden Sie ausschliesslich den Erhaltungsschein im Anhang
ESR-Nr: 81 16250 00010 05302 01545 77916

Seite 1 von 2

Bankverbindung: Bank Löhli, 8722 Kaltbrunn | IBAN CH55 0073 1544 4488 1300 2 | SWIFT: LINGCH23 | Clearing 8731

emde BLECHFABRIK AG
Flechtstrasse 2 | CH-8722 Kaltbrunn
Tel. +41 55 222 0 222 | Fax +41 55 222 0 221
info@emde.ch | www.emde.ch

emde **emde**

Auftragsdetails	
Auftragsnr.: 81606	Email: marvin.rhyner@gmail.com
Erstellt: 19.06.2023	Telefon: 0798821598
Zahlungsart: Twint	IP: 213.196.135.160
Versandart: Versandkostenfrei	Auftragsstatus: In Bearbeitung

Rechnungsadresse	Zustelladresse
Marvin Rhyner Bodenwies 10 9535 Wilen Schweiz	Marvin Rhyner Bodenwies 10 9535 Wilen Schweiz

Produkt	Artnr.	Menge	Preis	Gesamt
Neopixel WS2812B RGB LED	420021	210	0,90CHF	189,00CHF
Zwischensumme (exkl. Mwst.):				175,50CHF
Versandkostenfrei:				0,00CHF
7.7% MwSt.:				13,51CHF
Gesamtsumme:				189,01CHF

Auftragsdetails	
Auftragsnr.: 87913	Email: marvin.rhyner@gmail.com
Erstellt: 15.10.2023	Telefon: +41798821598
Zahlungsart: Twint	IP: 213.196.135.160
Versandart: PostPac Economy (Gewicht 13.00g)	Auftragsstatus: In Bearbeitung

Rechnungsadresse	Zustelladresse
marvin Rhyner Bodenwies 10 9535 Wilen b. Wil Schweiz	marvin Rhyner Bodenwies 10 9535 Wilen b. Wil Schweiz

Produkt	Artnr.	Menge	Preis	Gesamt
145x65mm Stripboard Prototyp PCB Platine	420563	1	3,60CHF	3,60CHF
Zwischensumme (exkl. Mwst.):				3,34CHF
PostPac Economy (Gewicht 13.00g):				6,41CHF
7.7% MwSt.:				0,75CHF
Gesamtsumme:				10,50CHF

Auftragsverlauf

Auftragsdetails	
Auftragsnr. #79912	Zahlungsart Twint
Datum 19.05.2023	Zustellart PostPac Economy (Gewicht 35.00g)

Rechnungsadresse	Zustelladresse
marvin Rhyner Bodenwies 10 9535 Wilen b. Wil Schweiz	marvin Rhyner Bodenwies 10 9535 Wilen b. Wil Schweiz

Name	Artnr.	Menge	Preis	Summe
Neopixel WS2812B RGB LED	420021	35	0,90CHF	31,50CHF
Zwischensumme (exkl. Mwst.)				29,25CHF
PostPac Economy (Gewicht 35.00g)				6,41CHF
7.7% MwSt.				2,75CHF
Gesamtsumme				38,40CHF

JUMBO

Rickenbach

Artikel	Menge	Preis	Aktion	Total
Klebesticks f. Mini	1	2.95		2.95
Klebesticks 10cm	1	3.50		3.50
Isola Montageband au	1	20.95		20.95
Isolierband schwarz	1	4.95		4.95

TOTAL CHF 32.35

Visa Debit 32.35

JUMBO-1047 Rickenbach
Toggenburgerstrasse 61
9532 Rickenbach b. Wil

*** Kundenbeleg ***

Buchung
Visa Debit contactless
VISA

XXXXXXXXXXXX363

16.10.2023 16:18:43
Iru-Id: 31556429
AID: A0000000031010
Irx. Seq-Cont: 43015
Irx. Ref-Nr: 76955489000
Auth. Code: 3F5561
Acq-Id: 2

Total-EFT CHF: 32.35

Wir danken

COOP GENOSSENSCHAFT, CHE-116.311.105

GR	NWST	TOTAL	NWST
1	7.70	32.35	2.31

Anzahl gekaufter Artikel 4

Erhalten physische Sammelmarken
Trophy

ES BEDIENTE SIE Frau Hasler

Vielen Dank für Ihren Einkauf!



16.10.23 16:18 07132 00147034 51 0001047

JUMBO

Junbo Rickenbach

Artikel	Menge	Preis	Aktion	Total
Schalltitelze	2	13.50		27.00

TOTAL CHF 29.20

VISA = 27.00

Buchung Visa Debit Contactless

XXXXXXXXXXXX363

14.07.2023 10:37:00

#31410025*00725001/VPPFRN/000000000024

Total-EFT CHF: 29.20

COOP GENOSSENSCHAFT, CHE-116.311.105

GR	NWST	TOTAL	NWST
0	2.50	2.20	0.05
1	7.70	27.00	1.93

Anzahl gekaufter Artikel 3

Erhalten physische Sammelmarken

Trophy

ES BEDIENTE SIE Frau Jozic

Vielen Dank für Ihren Einkauf!
Rückgabe nur mit Kassenschein



14.07.23 10:37 02063 00423967 002 0001047

JUMBO

Junbo Rickenbach

Artikel	Menge	Preis	Aktion	Total
Elektron.	1	9.95		9.95
Lötspitze 15Watt	1	3.95		3.95

TOTAL CHF 13.90

VISA 13.90

Buchung Visa Debit Contactless

XXXXXXXXXXXX363

27.05.2023 12:09:00

#31410025*00218026/VISA/000000000024

Total-EFT CHF: 13.90

COOP GENOSSENSCHAFT, CHE-116.311.105

GR	NWST	TOTAL	NWST
1	7.70	13.90	0.99

Anzahl gekaufter Artikel 2

Erhalten physische Sammelmarken

Trophy

Splash

ES BEDIENTE SIE Frau Kolliker

Vielen Dank für Ihren Einkauf!

Rückgabe nur mit Kassenschein



27.05.23 12:08 01212 00438169 005 0001047

Bestellbestätigung

Bestellung # 304-3016343-0409958

Guten Tag,

Vielen Dank für deine Bestellung! Wir werden dich benachrichtigen, sobald dein(e) Artikel versandt wurde(n). Du findest das voraussichtliche Lieferdatum weiter unten. Um deine Bestellung anzusehen oder zu verändern, besuche [Meine Bestellungen](#) auf unserer [Amazon.de](#) Website.

Zustellung:
Samstag, 3 Juni
Versandart:
Standardversand

Die Bestellung geht an:
Marvin
Wilen, Thurgau
Schweiz

Endbetrag: EUR 35,55
CHF 35,23*

Gewählte Zahlungsart: Visa

*Wechselkursgarantie Gebühr: CHF 0.69

Garantierter Wechselkurs für diese Bestellung: 1 EUR = 0.991032 CHF

Wechselkursgarantiegebühr über dem Referenzkurs der Europäischen Zentralbank: 2,09%



VCE 5 Paare DC 5.5 mm 2.1 mm DC Stecker DC Buchse Steckverbinder für CCTV-Kamera, LED Streifen Licht
Zustand: Neu
Verkauft von: VCELINK
Versand durch [Amazon](#)

EUR 5,79



Netzteil 5V 10A 50W/Netzadapter Transformator Ladegerät für LED Streifen, Router, Lautsprecher, LCD-Fernseher, Kameras, TV-Boxen, USB-Hub und 5V Heim-Elektronik
Zustand: Neu
Verkauft von: Velainwom
Versand durch [Amazon](#)

EUR 16,80



Adafruit 74AHCT125 - Quad-Level-Shifter (3 V auf 5 V) [ADA1757]
Zustand: Neu
Verkauft von: SHA 256 systems
Versand durch [Amazon](#)

EUR 5,97

Zustellung:
Montag, 5 Juni
Versandart:
Standardversand

Die Bestellung geht an:
Doris
Meersburg
Deutschland

Endbetrag: EUR 199,99
CHF 198,62*

Gewählte Zahlungsart: Mastercard

*Wechselkursgarantie Gebühr: CHF 3.89

Garantierter Wechselkurs für diese Bestellung: 1 EUR = 0.9931536 CHF

Wechselkursgarantiegebühr über dem Referenzkurs der Europäischen Zentralbank: 2,13%



Beomons Raspberry Pi 4 Modell B 4GB RAM mit 32GB Basis Starterkit mit Zubehör Montierter Raspberry Pi 4B Starter Kit mit Cortex A72 unterstützt Dual Display 4K/1000Mbps BT 5.0 Upgraded Raspberry Pi 3
Zustand: Neu
Verkauft von: EIOHT SARL
Versand durch [Amazon](#)

EUR 199,99

Wenn du ein mobiles Gerät verwendest, kannst du mit der kostenlosen [Amazon app](#) Lieferbenachrichtigungen empfangen und den Verlauf deiner Sendung auch unterwegs verfolgen.

Wir freuen uns auf deinen nächsten Besuch!

[Amazon.de](#)



Hornbach Baumarkt Schweiz AG
Filiale 757
Ebnetstrasse 5
CH-8370 Sirmach
Tel. +41 715 755 000
www.hornbach.ch
UID: CHE-101.079.884 MWST

ART/EAN 7611007373733
1 Pack x 1.50
Kabelbind. 100x2.5mm 1.50 1

ART/EAN 12299
0.012 kg x 32.15
KOTFLUGELSCHEIBEN 0.40 1

ART/EAN 4003984251570
2 Stück x 5.95
3F-Konsole 315 x 200 11.90 1

ART/EAN 4004338331252
1 Stück x 3.15
BALKENSCHUH 3.15 1

ART/EAN 4306517297039
1 Stück x 2.60
Filzgleiter 90x100x6 2.60 1

ART/EAN 17307
10 Stück x 0.17
Flachrundschr. Innen 1.70 1

ART/EAN 4306517594282
1 Stück x 10.40
Reparaturband 10.40 1

ART/EAN 4042448843289
1 Stück x 22.95
tesa Montageband Ind 22.95 1

ART/EAN 7612008024037
1.400 m x 1.75
1 x 2.45 2.45
Band PES schwarz, 40 2.45 1

SUMME [19] CHF 57.05
GEGEBEN VISA CHF 57.05

Attendant-Id: 1
ECR-Id: 1
ECR-Seq: 2026
EFT Ref-No: 00075420

Buchung Visa Debit Contactless
XXXXXXXXXXXX8363

30.09.2023 16:52
Trn-Id: 31533252
Trx. Seq-Cnt: 00075420
Auth. Code: 2YX6CJ
Acq-Id: 00000000002

Total-EFT CHF: 57.05

1 7.7 % BRUTTO 57.05 MWST 4.08 NETTO 52.97



Hornbach Baumarkt Schweiz AG
Filiale 757
Ebnetstrasse 5
CH-8370 Sirmach
Tel. +41 715 755 000
www.hornbach.ch
UID: CHE-101.079.884 MWST

ART/EAN 18834
20 Stück x 0.21
Halbrundkopfschr IS 4.20 1

ART/EAN 12697
0.015 kg x 265.05
MUTTERN 4.00 1

ART/EAN 12268
0.005 kg x 31.20
Scheiben 0.15 1

SUMME [22] CHF 8.35
GEGEBEN VISA CHF 8.35

Attendant-Id: 1
ECR-Id: 1
ECR-Seq: 859
EFT Ref-No: 00051663

Buchung Visa Debit Contactless
XXXXXXXXXXXX8363

16.10.2023 17:10
Trn-Id: 31533255
Trx. Seq-Cnt: 00051663
Auth. Code: 3FUXUN
Acq-Id: 00000000002

Total-EFT CHF: 8.35

1 7.7 % BRUTTO 8.35 MWST 0.60 NETTO 7.75



30 Tage Rücknahme nur gegen Kassenbon und in Originalverpackung. Von der Rücknahme ausgeschlossen sind: Sonderanfertigungen, Hygieneartikel, Pflanzen, Fische, Tierfutter sowie reduzierte Artikel.
>> Datum = Liefer- und Rechnungsdatum <<
0757 16.10.2023 17:07 0024 242424 008254



Hornbach Baumarkt Schweiz AG
Filiale 757
Ebnetstrasse 5
CH-8370 Sirmach
Tel. +41 715 755 000
www.hornbach.ch
UID: CHE-101.079.884 MWST

ART/EAN 4024596000226
1 Stück x 22.95
WEICON Abisolierzang 22.95 1

~~ART/EAN 4070500107104~~
~~2 Stück x 89.90~~
~~GARDENA Beussenerungs 179.80 1~~

~~ART/EAN 40705561~~
~~4 Stück x 6.95~~
~~GARDENA Schlauchverb 27.80 1~~

ART/EAN 4001845521268
3 Stück x 2.95
LOTSPIITZE 20 W 8.85 1

SUMME [10] CHF 239.40
GEGEBEN VISA CHF 239.40

Attendant-Id: 1
ECR-Id: 1
ECR-Seq: 2664
EFT Ref-No: 00033152

Buchung Visa Debit
XXXXXXXXXXXX8363

13.07.2023 07:32
Trn-Id: 31533256
Trx. Seq-Cnt: 00033152
Auth. Code: YMKBCR
Acq-Id: 00000000002

Total-EFT CHF: 239.40

1 7.7 % BRUTTO 239.40 MWST 17.12 NETTO 222.28



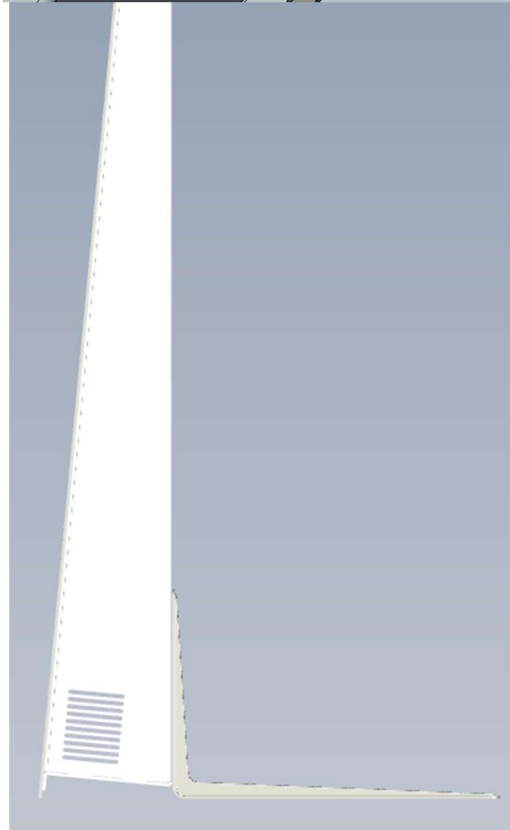
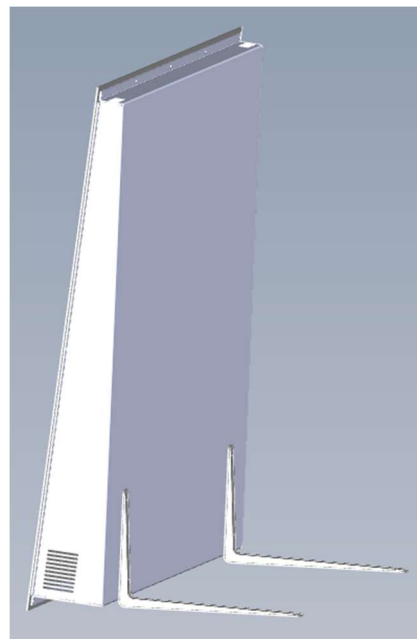
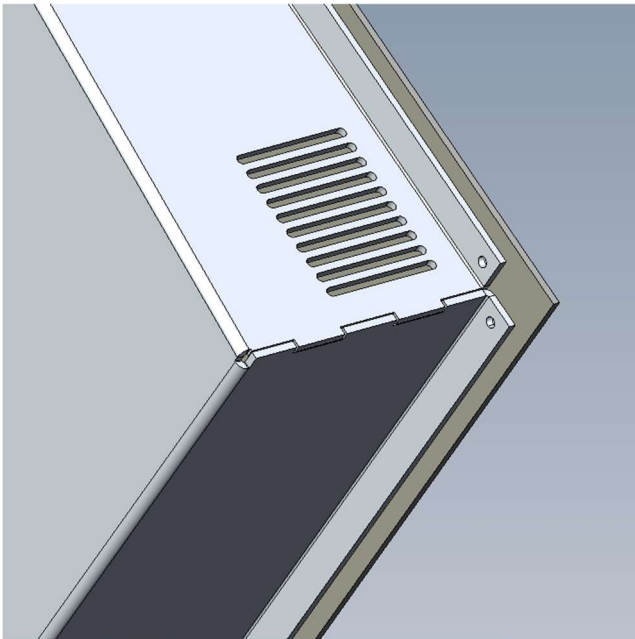
30 Tage Rücknahme nur gegen Kassenbon und in Originalverpackung. Von der Rücknahme ausgeschlossen sind: Sonderanfertigungen, Hygieneartikel, Pflanzen, Fische, Tierfutter sowie reduzierte Artikel.
>> Datum = Liefer- und Rechnungsdatum <<
0757 13.07.2023 07:32 0002 000908 009967

10.2 Befehl autonom aufstarten

```
cd /etc/xdg/autostart  
sudo nano LED13start.desktop
```

```
cd /usr/bin  
sudo nano LED13start.sh15
```

10.3 CAD Zeichnung Rückplatte



¹⁵ <https://www.youtube.com/watch?v=yDJgohRfTb0>