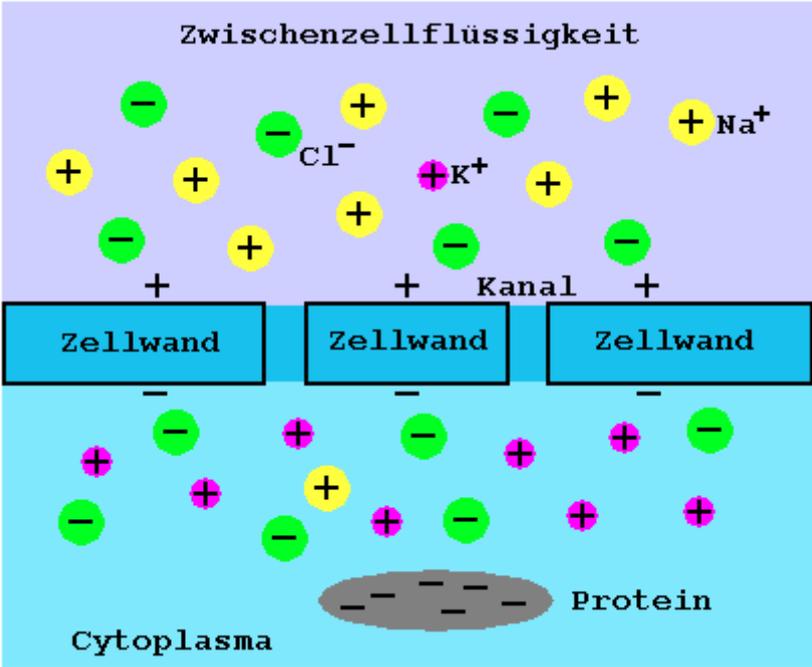


# Nervenzelle

Alfons Reichert



# Inhalt

<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Biochemische Grundlagen .....</b>	<b>2</b>
<b>3. Elektronische Nervenzelle .....</b>	<b>5</b>
3.1 Schaltung .....	5
3.2 Aufbau.....	6
3.3 Versuch .....	10
<b>4. Literatur.....</b>	<b>13</b>

## 1. Einleitung

Die Biophysik hat sich in den letzten Jahrzehnten zu einer eigenständigen Teildisziplin der Physik entwickelt. Biophysiker untersuchen die biologischen Vorgänge im Tier- und Pflanzenreich mit physikalischen Methoden. Sie entwickeln und bauen Modelle, um die Vorgänge in der Natur simulieren und so besser verstehen zu können. Sie beschreiben die Abläufe mit mathematischen Gesetzen, etwa die Entwicklung der Populationen von Raubtieren und ihren Beutetieren unter verschiedenen Umweltbedingungen. Bei den Schülerinnen und Schülern stoßen biophysikalische Themen meist auf großes Interesse, da wir im Alltag ständig mit ihnen konfrontiert werden. Wie ein Auge aufgebaut ist und wie man mit ihm sieht, wird in der Mittelstufe ausführlich behandelt. Auch das Hören mit den Ohren und das Sprechen mit Hilfe der Stimmbänder und des Mund- und Rachenraums sind nach fast allen Lehrplänen ein Muss. Wie Nervenimpulse von Nervenzelle zu Nervenzelle weitergeleitet werden, bietet einen weiteren interessanten Kontext für den Physikunterricht. In der Oberstufenchemie werden die Vorgänge meist im Zusammenhang mit den chemischen Potentialen im Themenbereich Nernstsche Gleichung diskutiert. Leider stehen in der Schule nicht die experimentellen Geräte zur Verfügung, mit denen man die Potentiale an den Nervenzellen unmittelbar messen kann. Abhilfe schafft eine elektronische Schaltung, die die Vorgänge simuliert. In diesem Skript wird ausführlich beschrieben, wie sie aufgebaut ist, wie man sie mit wenigen elektronischen Bauteilen selbst bauen kann und wie man mit ihr die Potentiale beim Erregen der Nervenzelle nachbilden und aufzeichnen kann. Die Schülerinnen und Schüler können so die Abläufe in einer lebenden Zelle besser nachvollziehen und verstehen. Ich wünsche Ihnen viel Spaß beim Lesen und Basteln.

Stolberg, im April 2015 und im Juli 2019

## 2. Biochemische Grundlagen

Anhand der Abb. 1a-d kann man die biochemischen Vorgänge erklären, die sich in einer Zelle abspielen, wenn sie von außen erregt wird und einen Sinneseindruck weiterleiten soll.

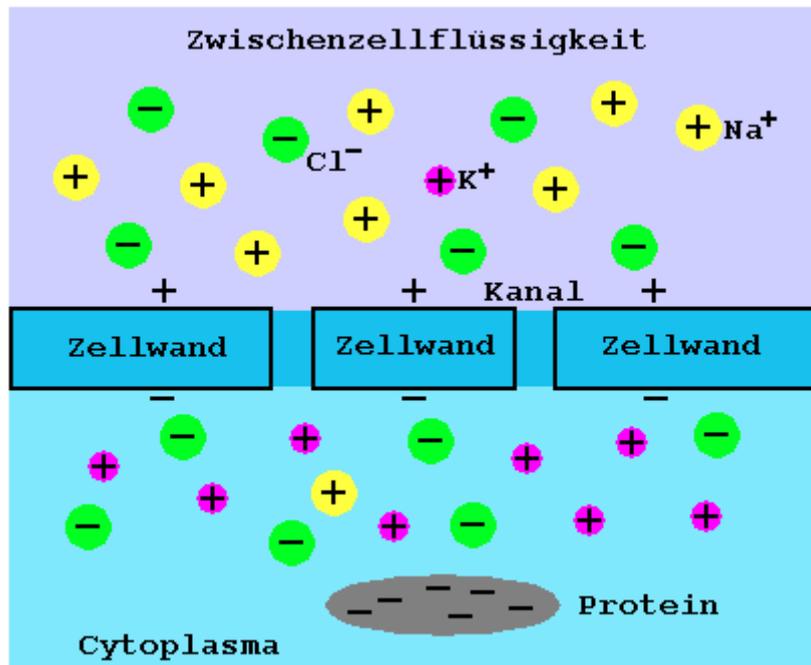


Abb. 1a: Zelle im Ruhezustand

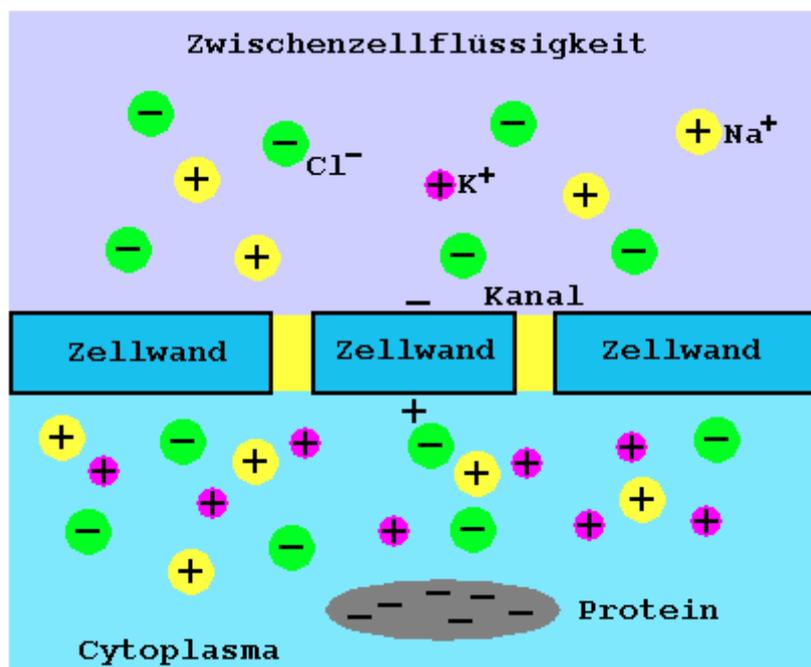
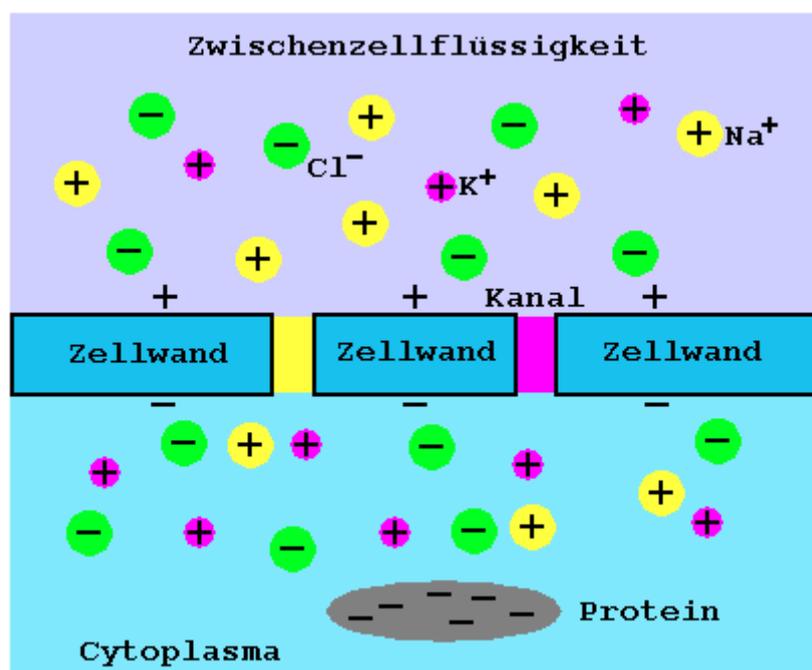


Abb. 1b: Depolarisation der Zelle

Im nicht angeregten Zustand ist die Konzentration der  $\text{Na}^+$ -Ionen im Bereich zwischen den einzelnen Zellen, in der Zwischenzellflüssigkeit, sehr viel höher als im Zellinnern, dem Cytoplasma (s. Abb. 1a). Für die  $\text{K}^+$ -Ionen ist es umgekehrt. Die Konzentration der  $\text{Cl}^-$ -Ionen ist in beiden Bereichen gleich. Gleichzeitig liegen in der Zelle zusätzliche negative Ladungen vor,

die an Proteine gebunden sind. Durch das Konzentrationsgefälle der Natrium- und Kaliumionen zwischen extra- und intrazellulärem Bereich bildet sich nach der Nernstschen Gleichung an der Zellwand eine elektrochemische Potentialdifferenz, eine Spannung, aus, die im Ruhezustand etwa  $\Delta U = -90 \text{ mV}$  beträgt. Das Zellinnere ist der negative Pol, das Zelläußere der positive. Die Kanäle durch die Zellwand, auch Zellmembran genannt, sind in diesem Zustand für die kleinen  $\text{K}^+$ -Ionen etwas durchlässig, für die größeren  $\text{Na}^+$ -Ionen kaum.

Wird die Potentialdifferenz an der Zellmembran durch einen Spannungsimpuls von außen auf  $\Delta U = -40 \text{ mV}$  erhöht, so lassen die Kanäle zunächst vermehrt  $\text{Na}^+$ -Ionen passieren. Sie wandern in die Zelle, um ihr Konzentrationsgefälle zwischen innen und außen auszugleichen (s. Abb.1b). Die Ladungsverteilung zwischen extra- und intrazellulärem Bereich kehrt sich um. Die Zelle depolarisiert (s. Abb. 1b). Zwischen innen und außen misst man eine Potentialdifferenz von  $\Delta U = +20 \text{ mV}$  mit dem positiven Pol im Zellinnern und dem negativen in der Zwischenzellflüssigkeit.



**Abb. 1c: Repolarisation der Zelle**

Durch die Potentialumkehr entsteht an der Zellwand ein kurzzeitiger Spannungspuls, Aktionspotential genannt. Dieser Zustand hält nur für kurze Zeit an. Nach und nach werden die  $\text{Na}^+$ -Ionen wieder aus der Zelle nach außen gepumpt.

Gleichzeitig wandern einige  $\text{K}^+$ -Ionen wegen ihres Konzentrationsgefälles aus dem Cytoplasma in die Zwischenzellflüssigkeit (s. Abb. 1c), da die Kanäle auch für die  $\text{K}^+$ -Ionen durchlässig werden. Es stellt sich wieder die ursprüngliche Ladungsverteilung zwischen innen und außen ein. Die Zelle repolarisiert. Sind alle überschüssigen  $\text{Na}^+$ -Ionen aus dem Zellinnern wieder nach außen befördert, so verursacht der Überschuss an  $\text{K}^+$ -Ionen im Vergleich zum Ruhezustand im Zelläußern vorübergehend eine erhöhte Konzentration an positiven Ladungen. Die Zelle hyperpolarisiert (s. Abb. 1d). Mit der Zeit fließen die überschüssigen  $\text{K}^+$ -Ionen aus der Zwischenzellflüssigkeit in die Zelle zurück und die Zelle nimmt wieder den Ausgangszustand nach Abb. 1a ein.

Der durch den Ionenaustausch zwischen innen und außen erzeugte Spannungsimpuls wird über die Zwischenzellflüssigkeit von Zelle zu Zelle weitergereicht. Er gelangt so zum Gehirn, in dem er ausgewertet und als Sinneseindruck gedeutet wird, abhängig davon, welches Sin-

nesorgan die Erregung der Nervenzelle ausgelöst hat. Hält die Erregung an, so sendet die Zelle permanent Spannungsimpulse. Je stärker der Reiz ist, umso öfter feuert sie pro Sekunde. Die Amplitude der einzelnen Impulse bleibt dagegen gleich. Die Experten sprechen von frequenzcodierter Übertragung der Reizstärke.

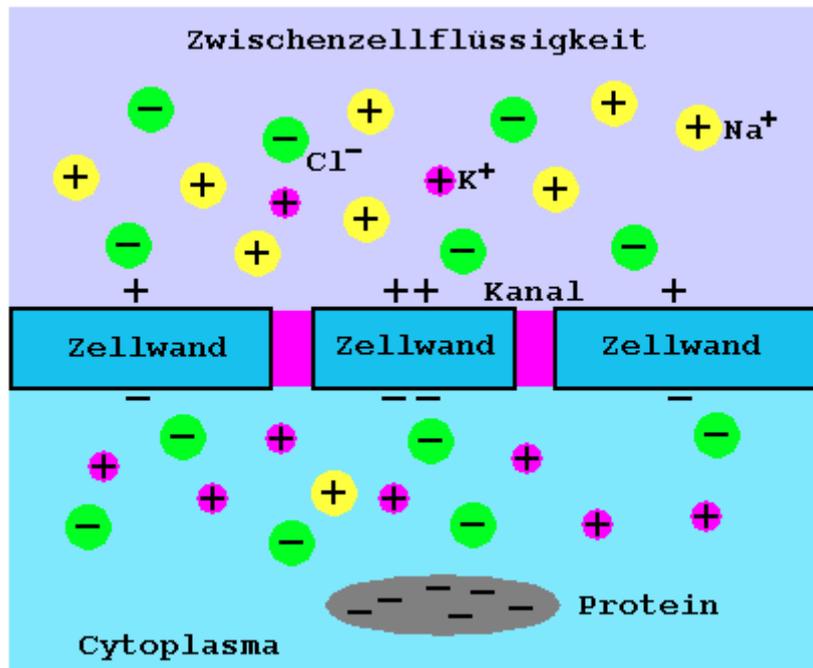


Abb. 1d: Hyperpolarisation der Zelle

### 3. Elektronische Nervenzelle

#### 3.1 Schaltung

Um die Vorgänge in einer Nervenzelle elektronisch zu simulieren, benötigt man eine Schaltung, die auf einen von außen angelegten Spannungsimpuls mit einer kurzzeitigen Spannungsspitze reagiert. Je höher die Anregungsspannung, umso öfter muss die Schaltung pro Sekunde Spannungsimpulse aussenden. Die Schaltung in Abb.1 erfüllt diese Anforderungen. Sie wurde im Jahre 2000 von Maeda und Makino veröffentlicht.<sup>1),2)</sup> Ich habe die Schaltung ein wenig angepasst, damit sie übersichtlicher wird und man preiswertere Bauteile verwenden kann. Die Idee dazu stammt von Zeitter.<sup>3)</sup>

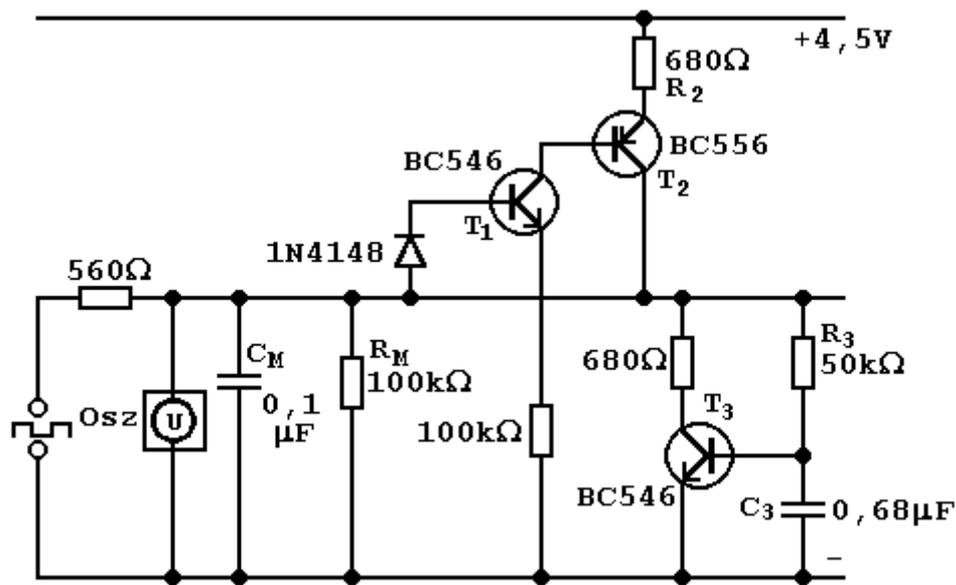


Abb.1: Elektronische Nervenzelle

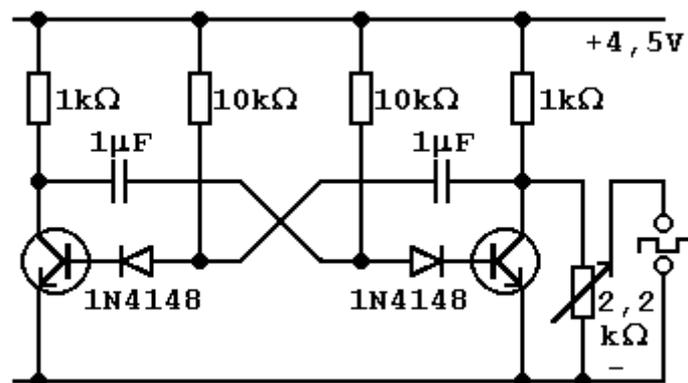


Abb.2: Multivibrator

Um sie anzuregen, benötigt man zusätzlich den Rechteckgenerator nach Abb.2, auch Multivibrator genannt. Beide werden mit einer gemeinsamen Spannungsquelle von  $U = 4,5 \text{ V}$ , also z.B. einer Flachbatterie, betrieben. Außerdem verbindet man den Rechteckausgang des Multivibrators mit dem Rechteckeingang der elektronischen Nervenzelle. Mit einem her-

kömmlichen Oszillographen oder einem Messwerterfassungssystem wie z.B. Cassy der Firma Leybold greift man die Spannung am Osz-Ausgang ab.

Die Schaltung funktioniert wie folgt. Legt man an den Eingang der Nervenzelle die Rechteckspannung des Multivibrators, so lädt sich der Membrankondensator  $C_M$  auf diese Spannung auf (s. Versuch Abb. 2). Sie liegt über die Diode mit fast vollem Wert auch an der Basis von Transistor  $T_1$ . Die Transistorkombination aus  $T_1$  und  $T_2$  schaltet durch. Auf den Membrankondensator  $C_M$ , der die Zellmembran simuliert, fließen über den Emitterwiderstand  $R_2$  zusätzliche Ladungen und laden ihn fast auf die volle Betriebsspannung auf. In der realen Nervenzelle strömen Natriumionen in die Zelle. Am Emitterwiderstand  $R_2$  des Transistors  $T_2$  fällt durch den Stromfluss eine Spannung ab, die den Ladungszufluss zum Kondensator  $C_M$  begrenzt. Da gleichzeitig über den Membranwiderstand  $R_M$  Ladungen vom Kondensator  $C_M$  abfließen, stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Zu- und Abfluss ein. Die Spannung am Membrankondensator pendelt sich innerhalb kürzester Zeit auf einen mittleren Wert ein (s. Versuch Abb. 3). Nach und nach lädt sich auch der Kondensator  $C_3$  an der Basis des Transistors  $T_3$  über den Widerstand  $R_3$  auf und schaltet ihn mit einer zeitlichen Verzögerung durch. In der wirklichen Nervenzelle strömen jetzt Kaliumionen aus der Zelle in die Zwischenzellflüssigkeit. Dadurch werden die beiden Kondensatoren entladen, die Spannung an ihnen sinkt fast auf null. Transistor  $T_3$  deaktiviert sich selbst. Gleichzeitig wird Transistor  $T_1$  abgeschaltet, da an ihm nicht mehr die benötigte Basisspannung anliegt. Die Schaltung befindet sich im Ausgangszustand und kann erst durch einen neuen Spannungsimpuls des Multivibrators wieder aktiviert werden. Ist der mittlere Wert der Rechteckspannung hoch genug, so wiederholt sich der Vorgang periodisch von selbst, da der Membrankondensator durch sie nach dem Entladen immer wieder auf die benötigte Erregerspannung nachgeladen wird. Außerdem schaltet Transistor  $T_3$  zeitlich eher durch, da sich der Kondensator  $C_3$  nach kürzerer Zeit auf die benötigte Basisspannung für  $T_3$  aufgeladen hat. Der Membrankondensator wird fortlaufend geladen und entladen. Die Nervenzelle feuert permanent (s. Versuch Abb. 4). Die Hyperpolarisation kann man im Versuch in den Abb. 3 und 4 nur ansatzweise erkennen. Um sie zu verstärken, muss man einen Membrankondensator mit größerer Kapazität verwenden. Dann lässt sich jedoch der Effekt im Versuch in Abb. 3, dass die Transistoren  $T_1$  und  $T_2$  bzw.  $T_3$  zeitversetzt durchgeschaltet werden, nicht mehr demonstrieren. Er stellt sich nur in einem kleinen Bereich der Multivibratorspannung ein.

Schaltet man mehrere elektronische Nervenzellen hintereinander, so kann man zeigen, wie das Reizsignal von Zelle zu Zelle weitergeleitet wird. Markus Elshorn, Dr. Christian Fauser und Markus Feser vom Didaktikzentrum MIND der Universität Würzburg haben zu diesem Thema ein interessantes Schülerexperiment entwickelt, das mit wenigen elektronischen Bauteilen auskommt.<sup>4)</sup>

### 3.2 Aufbau

Für den Aufbau benötigt man die Bauteile in Tabelle 1. Da es sich durchweg um gängige Bauteile handelt, sind sie allesamt in jedem Elektronikgeschäft oder im Fachhandel erhältlich. Außerdem braucht man das übliche Lötmaterial, wie Lötzinn, LötKolben und ein Stück Schalllitze von circa  $l = 2\text{m}$  Länge. Die Abb. 1 und 2 zeigen die Verschaltung der Nervenzelle und des Multivibrators auf je einer Lochrasterplatine. Man kann für beide auch eine gemeinsame Platine der Größe  $8 \times 6\text{cm}^2$  benutzen. Man lötet zunächst die Bauteile und die Zu- und Ableitungen auf die Platine.

Menge	Bauteil	Wert
1	Lochrasterplatine RM 2,54 mm	8x6cm <sup>2</sup>
4	Transistor npn	BC 546
1	Transistor pnp	BC 556
3	Diode	1N4148
4	Widerstand	100kΩ
2	Widerstand	10kΩ
2	Widerstand	1kΩ
2	Widerstand	680Ω
1	Widerstand	560Ω
1	Potentiometer Achse 8mm	2,2kΩ linear
1	Drehknopf für Achse 8mm	
2	Kondensator	1μF
1	Kondensator	0,47μF
1	Kondensator	0,22μF
1	Kondensator	0,1μF
1	Mon-Cherry-Dose	
2	Telefonbuchse rot	8mm
2	Telefonbuchse schwarz	8mm
4	Lötöse	8mm
2	Holzschraube	10x3mm
2	Holzleiste	30x6mmx6mm

**Tabelle 1: benötigte Bauteile**

In den Deckel der Gehäusedose bohrt man mit einem Holzbohrer am rechten oberen Rand vier Löcher mit einem Durchmesser von 8mm für die Buchsen der Spannungsversorgung und des Oszillographenausganges und in die Mitte des Deckels ein Loch mit 10mm Durchmesser für das Potentiometer. Man verschraubt die Buchsen am Deckel. Die Achse des Potentiometers kürzt man mit einer kleinen Säge, so dass der Drehknopf ganz auf die Achse passt. Dann befestigt man das Potentiometer am Deckel und steckt den Knopf auf. Die kleinen Holzleisten klebt man mit etwas Patex von innen auf den Boden der Dose und zwar im Abstand der Breite der Platine. In zwei gegenüberliegende Ecken der Platine bohrt man je ein Loch mit 3mm Durchmesser. Dann verschraubt man die Platine mit den Holzschrauben an den Holzleisten. Mit Hilfe der Lötösen verbindet man die Schaltlitzen des Spannungseinganges und des Oszillographenausganges mit den entsprechenden Buchsen und zwar die Pluspole mit den roten Buchsen und die Minuspole mit den schwarzen. Die Potiaugänge des Multivibrators verlötet man mit den seitlichen Eingängen des Potentiometers, den positiven MV-Eingang der Nervenzelle mit seinem Mittenabgriff. Den negativen MV-Ausgang des Multivibrators und den negativen MV-Eingang der Nervenzelle kann man direkt miteinander verbinden. Die Schaltung ist damit einsatzbereit. Mit ihr kann man die Kurven aus Kapitel 3.3 aufnehmen. Den fertigen Aufbau entnehmen Sie Abb. 3.

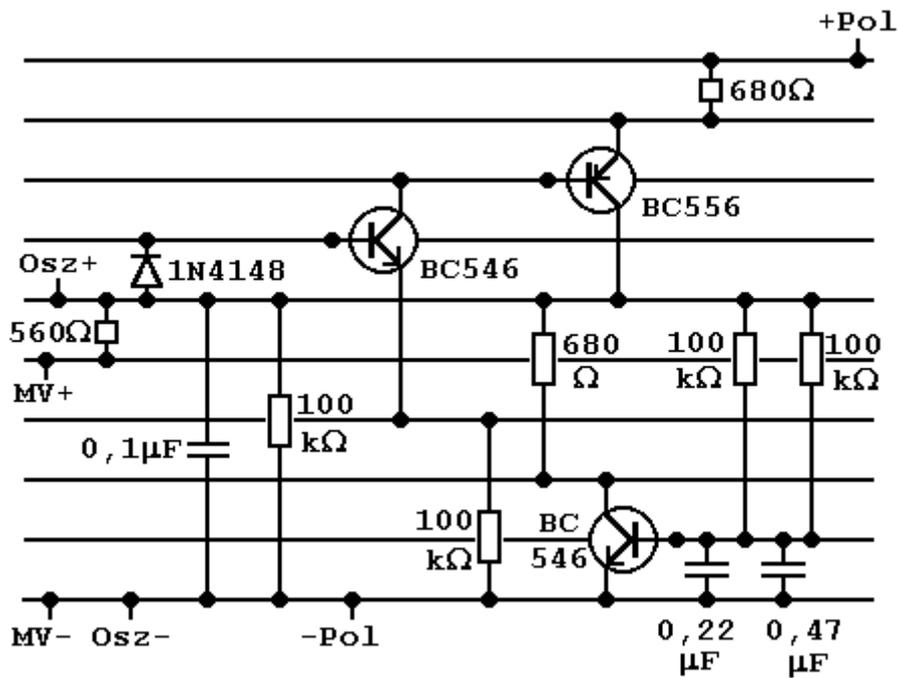


Abb.1: Verschaltung der Nervenzelle

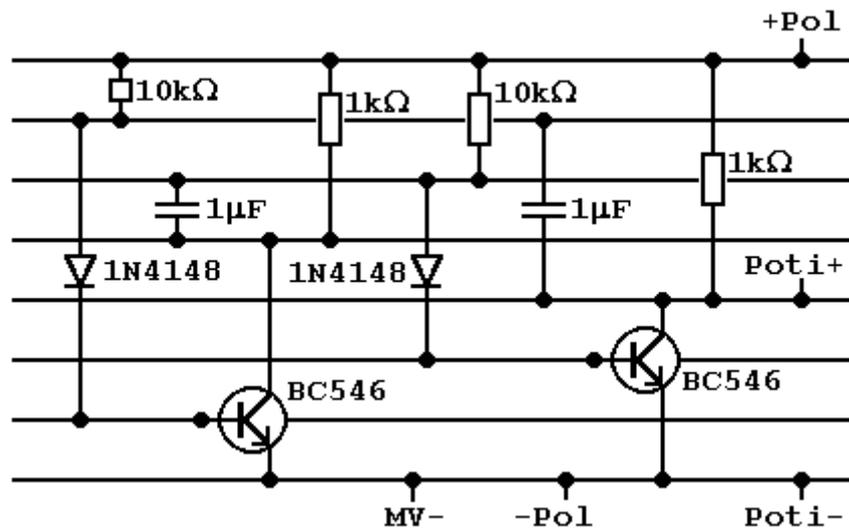


Abb.2: Verschaltung des Multivibrators

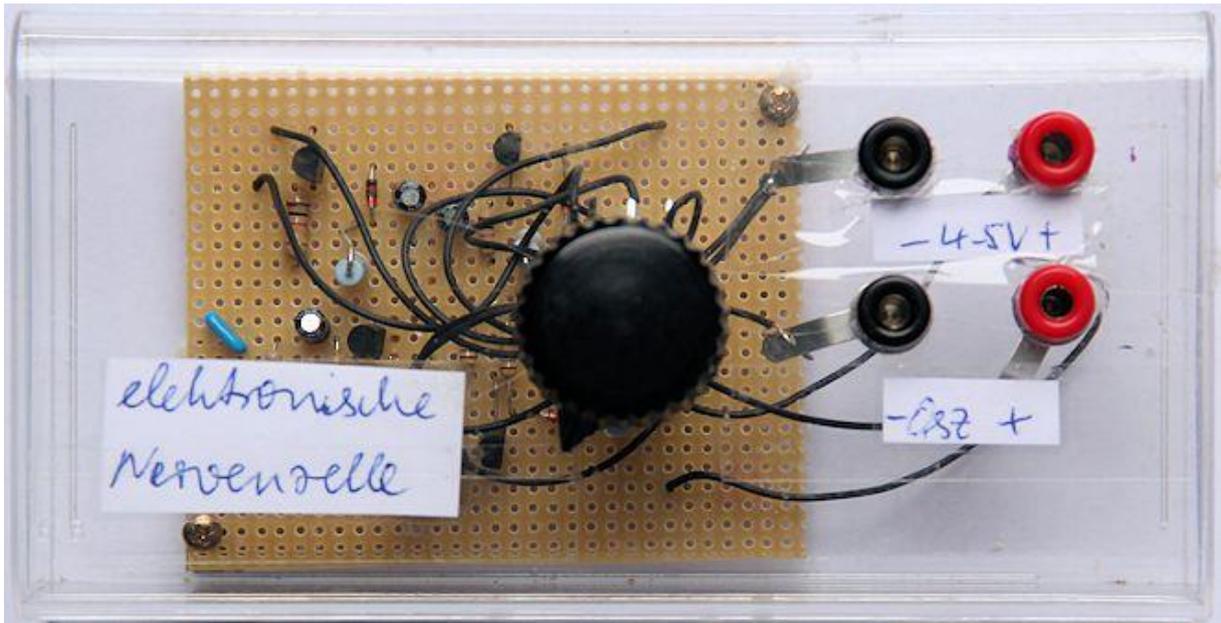


Abb.3: Elektronische Nervenzelle

### 3.3 Versuch

#### Aufbau:

Abb.1 zeigt den benötigten Versuchsaufbau mit cassy mobile.

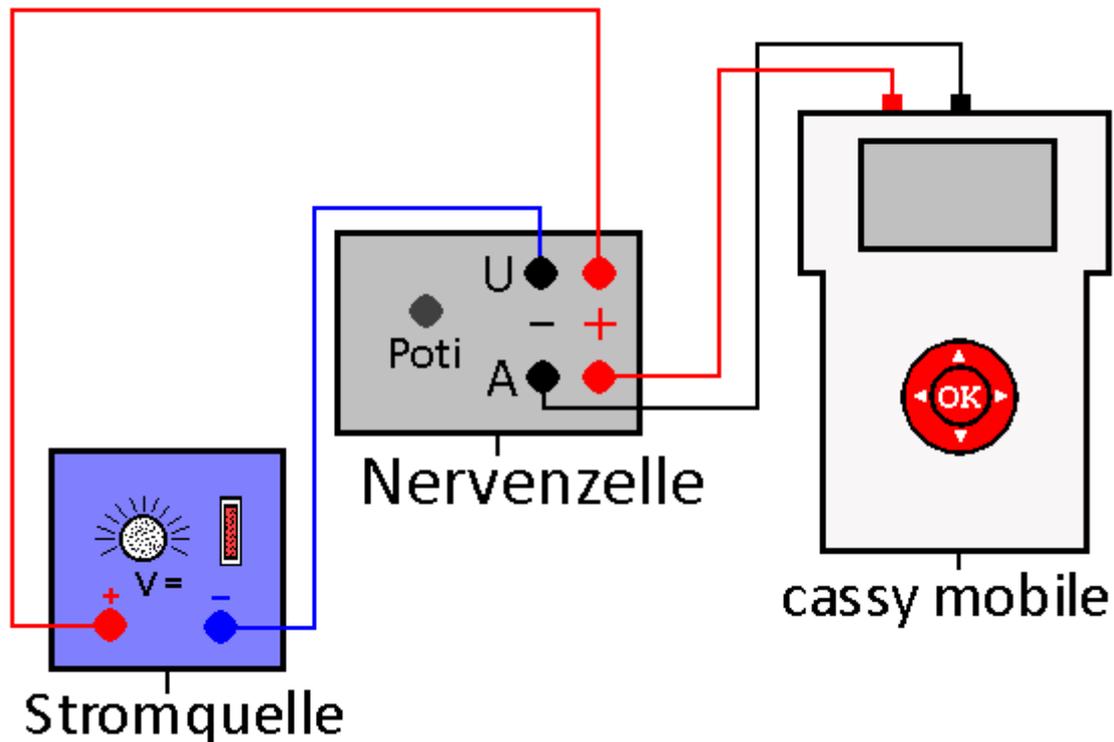


Abb.1: Versuchsaufbau

#### Durchführung:

Bauen Sie den Versuch gemäß Abb. 1 auf. Wählen Sie in cassy mobile als Messzeit  $t = 50 \text{ ms}$  bei einer Auflösung  $\Delta t = 100 \mu\text{s}$ . Legen Sie eine Gleichspannung  $U = 4,5 \text{ V}$  an den Eingang U der Schaltung. Drehen Sie das Poti in die mittlere Stellung. Starten Sie cassy mobile. Die Messung stoppt automatisch. Speichern Sie die Kurve. Erhöhen Sie die Erregerspannung, indem Sie das Poti ein wenig im Uhrzeigersinn drehen. Wiederholen Sie die Messung. Drehen Sie das Poti noch etwas weiter nach rechts und starten Sie cassy erneut.

#### Beobachtung:

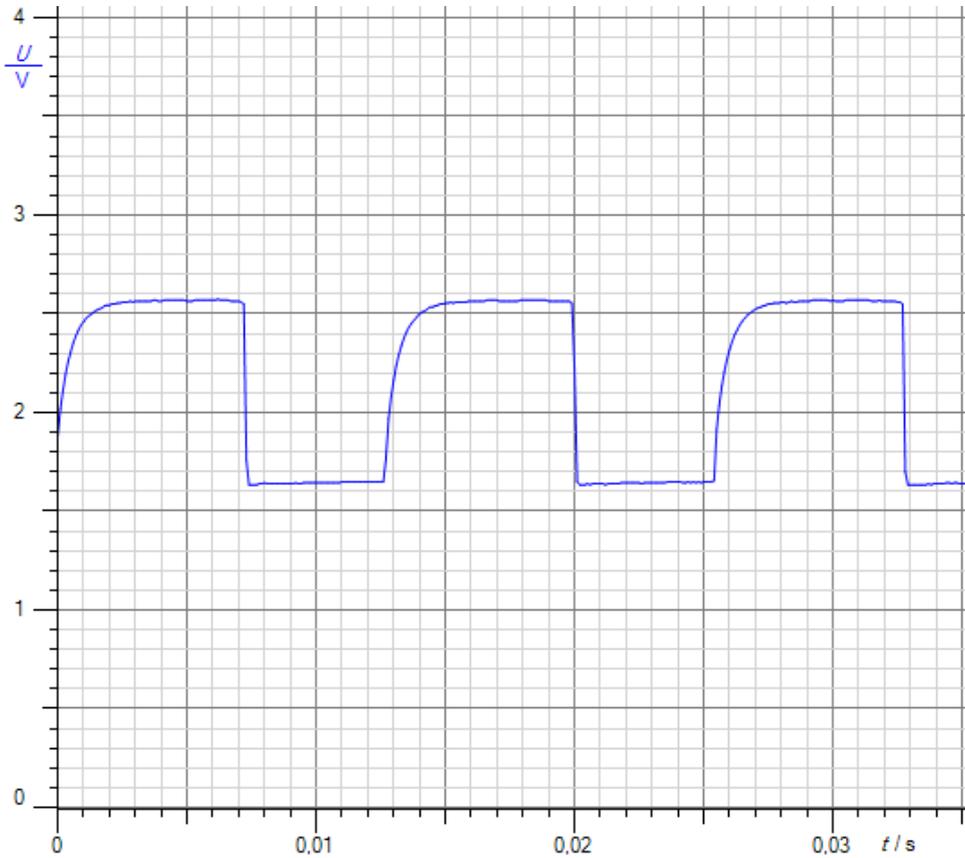
Erhöht man allmählich die Erregerspannung am Eingang der Nervenzelle mit Hilfe des Potentiometers am Ausgang des Multivibrators, so zeichnet Cassy die Kurven in Abb. 2 - 4 auf.

#### Auswertung:

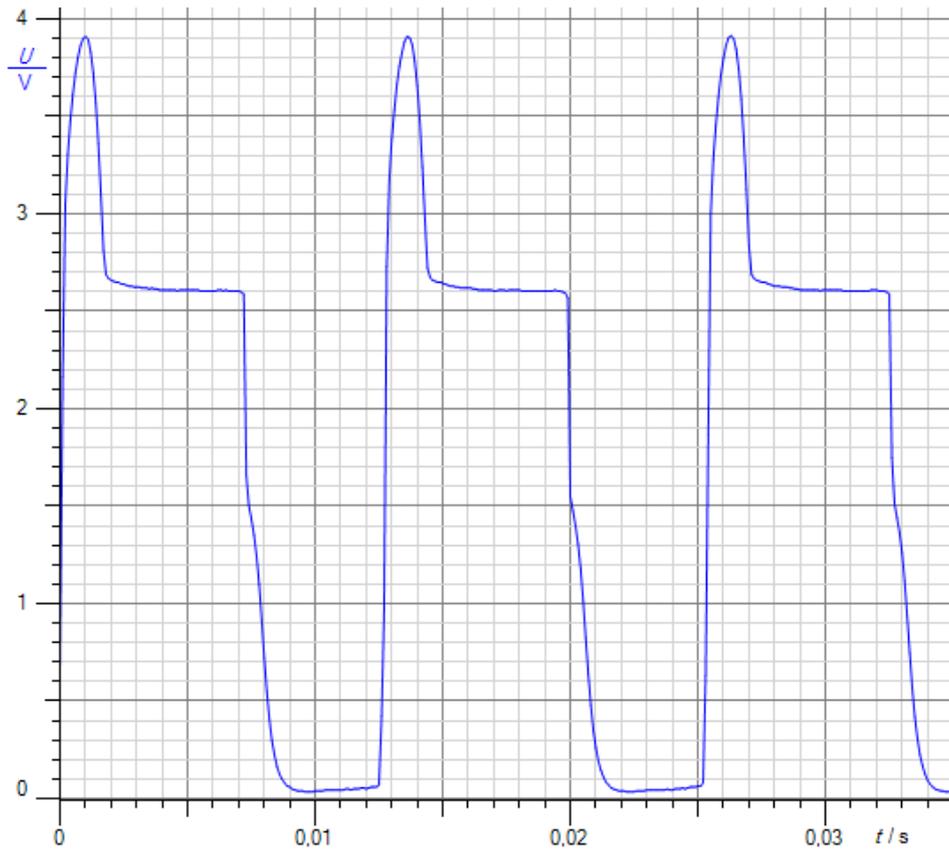
Bei einer niedrigen Erregerspannung des Multivibrators zündet die Nervenzelle nicht. Cassy zeichnet nur den Spannungsverlauf am Erregereingang der Zelle, also die Multivibratorspannung auf (s. Abb. 2). Erhöht man die Rechteckspannung am Eingang der Nervenzelle, so sendet sie in jeder Periode der Rechteckspannung genau einen Spannungsimpuls aus (s. Abb. 3). Ist die Eingangsspannung groß genug, so feuert die Nervenzelle mit erhöhter Frequenz permanent, erkennbar an den kontinuierlichen Spannungsimpulsen am Ausgang der Zelle in Abb. 4. Die Zelle ist dauerhaft erregt.

Die Schaltung simuliert die Vorgänge in einer realen Nervenzelle sehr gut. Bei zu kleiner Erregung feuern beide nicht, bei mittlerer Erregung setzen sie einen Impuls pro Reiz ab, bei hoher Erregung feuern beide permanent mit erhöhter Frequenz. Je stärker der Reiz ist, umso öfter feuert die reale Nervenzelle pro Sekunde. Die Amplitude der einzelnen Impulse bleibt

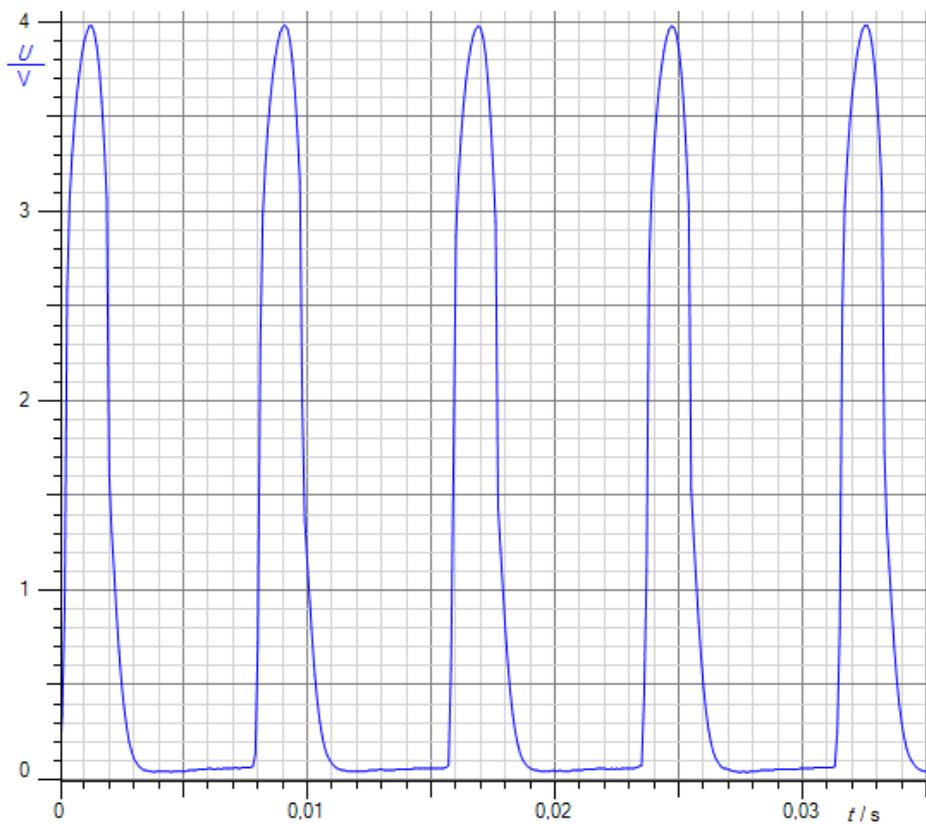
dagegen gleich. Die Experten sprechen von frequenzcodierter Übertragung der Reizstärke. Bei der Simulationsschaltung ist das allerdings nur bis zu einer gewissen Anregungsspannung der Fall. Danach bleibt die Frequenz konstant.



**Abb.2: Niedrige Erregerspannung**



**Abb.3: Mittlere Erregerspannung**



**Abb.4: Hohe Erregerspannung**

## 4. Literatur

- 1) Y. Maeda, H. Makino: A pulse-type-hardware neuron model with beating, bursting excitation and plateau potential, *BioSystems* 58 (2000), S. 93-100
- 2) [people.ece.cornell.edu/land/PROJECTS/NeuralModels/](http://people.ece.cornell.edu/land/PROJECTS/NeuralModels/)
- 3) W. Zeitter: Hardware-Neuronen, *Praxis der Naturwissenschaften PHYSIK in der Schule*, Heft 4/63, Juni 2014, S. 21-25
- 4) M. Elshorn, Ch. Fauser, M. Feser: Wenn die Erregung überspringt, *Praxis der Naturwissenschaften PHYSIK in der Schule*, Heft 4/63, Juni 2014, S. 31-36