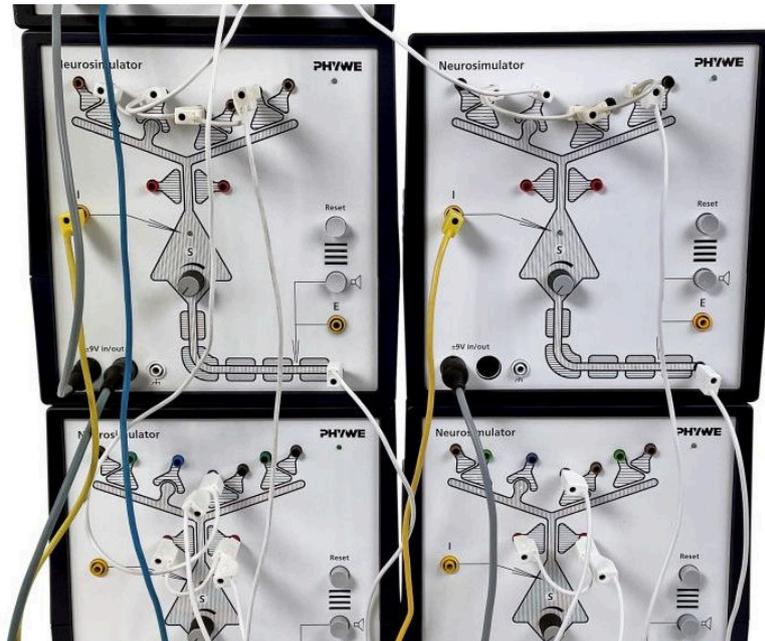


# Neuronale Netze mit Cobra SMARTsense



Versuche zum Thema neuronale Netze. In Vorbereitung auf diese Versuche wird dringend empfohlen, die Versuche zur Nervenzelle mit einer Nervenzelle und Nervenzellen-Interaktionen mit zwei Nervenzellen vorher durchzuführen. Das dafür erforderliche Material ist in diesen Versuchen zu den neuronalen Netzen bereits enthalten.

Biologie

Nervensystem / Neurobiologie



Schwierigkeitsgrad

schwer



Gruppengröße

-



Vorbereitungszeit

10 Minuten



Durchführungszeit

45+ Minuten

This content can also be found online at:



<http://localhost:1337/c/63e0d6f124ee62000359503e>



# PHYWE



## Allgemeine Informationen

### Anwendung

PHYWE

Das menschliche Gehirn besteht aus Milliarden von Neuronen, die durch Synapsen miteinander verbunden sind und Informationen auf elektrische und chemische Signale übertragen.

Diese Interaktionen ermöglichen es dem Gehirn, komplexe Funktionen wie Gedächtnis, Wahrnehmung, Bewegung und Denken auszuführen.



Typische Versuchsaufbauten mit 3 und 4 Nervenzellen

## Sonstige Informationen (1/2)

PHYWE

### Vorwissen



Das beiden Experiment "Die Nervenzelle" (P4010769) und "Interaktion von Nervenzellen" (P4010869) sollten vorher durchgeführt werden.

### Prinzip



Lehrsystem zur Durchführung von Experimenten zu den Themen Nervenzellen, Nervenzellinteraktionen und neuronale Netzwerke. Mit den beiden Spannungssensoren wird die Stärke der auf die Nervenzellen wirkenden Reize gemessen sowie das sich aus den verschiedenen Verschaltungen zwischen zwei Nervenzellen resultierendem Membranpotenzial (EPSP).

## Sonstige Informationen (2/2)

PHYWE

### Lernziele



Die SchülerInnen und Studierenden lernen in diesem Versuch, welche komplexen Möglichkeiten neuronale Netze schon bei der Verschaltung von drei bzw. vier Nervenzellen bieten. Um nur zwei Beispiele zu nennen: die innere Uhr, die z.B. den Schlafrythmus bestimmt, Kurzzeitgedächtnis und sensorisches Lernen.

### Aufgaben



Das Experiment besteht aus 6 Beispielen aus der weiten Welt neuronaler Netze, die unabhängig voneinander durchgeführt werden können:

(1) Transiente (phasische) Antworten mit Schwerpunkt auf den Sehsinn, (2) neuronaler Oszillator (z.B. innere Uhr), (3) kreisende Erregung (Kurzzeitgedächtnis), (4) Großhirnrinde und sensorisches Lernen, (5) Richtungsselektivität durch unilaterale Hemmung und Selbstkalibrierung paariger sensorischer Kanäle.

## Sicherheitshinweise

PHYWE



Für diesen Versuch gelten die allgemeinen Hinweise zum sicheren Experimentieren im naturwissenschaftlichen Unterricht.

## Material

Position	Material	Art.-Nr.	Menge
1	Set Neurobiologie mit einer Nervenzelle mit Cobra SMARTsense	65963-22	1
2	Neurosimulator	65963-00	3

## Theorie 1

PHYWE

### Transiente (phasische) Reaktionen beim Sehsinn

Eine Art von Neuronen reagiert nur auf veränderte Stimulationen, nicht auf anhaltende Stimulationen. Diese werden als ON- und OFF-Neuronen bezeichnet. Sie reagieren nur auf den Beginn und/oder das Verschwinden eines Reizes mit einer Aktivierung, die meist kurz ist und umso intensiver, je stärker die Reizänderung ist. Diese beiden Arten von Neuronen wirken auf andere Neuronen, z. B. auf Ganglionneuronen des visuellen Sinnessystems. Darüber hinaus gibt es solche Neuronen auch im Tast- und Geruchssinnsystem. Die Schaltung in diesem Experiment - ein Beispiel aus dem visuellen System - kann verwendet werden, um die **Verschaltung von Ganglienzellen der Netzhaut mit amakrinen Zellen** zu zeigen. In der Netzhaut kommen die Sehzellen mit Bipolarzellen in Kontakt, von denen meist mehrere mit jeweils einer Ganglienzelle verbunden sind. Außerdem sind die Sehzellen untereinander über Horizontalzellen und die Ganglienzellen über die amakrinen Zellen verschaltet. Jede Nervenzelle empfängt also Signale von mehreren Sinneszellen, und jede Sinneszelle leitet Signale an mehrere Nervenzellen weiter. An den bipolaren, horizontalen und amakrinen Zellen bauen sich Rezeptorpotenziale auf, an den Ganglienzellen hingegen werden zuerst Aktionspotenziale gebildet.

PHYWE



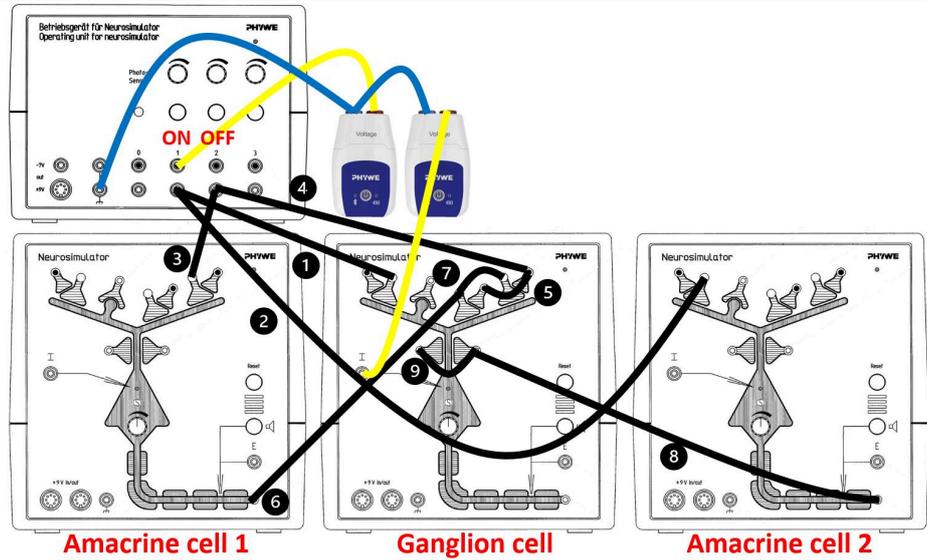
## Aufbau und Durchführung 1

## Aufbau 1.1

PHYWE

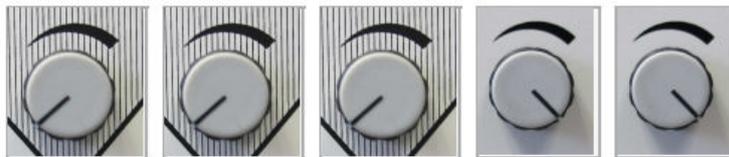
### Transiente (phasische) Reaktionen beim Sehsinn

Die Verschaltung so aufbauen wie in der Abbildung rechts gezeigt.



## Aufbau 1.2

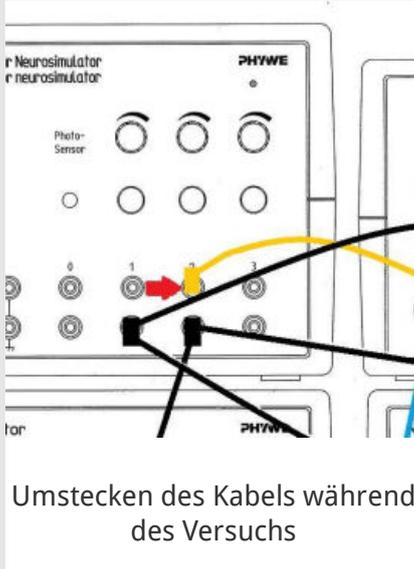
PHYWE



- Neurosimulator 1, 2 und 3: Drehknopf Feuerschwelle: 0%
- Betriebsgerät: Drehknopf Reizintensität 1 (Stimulus für AN): 100%
- Betriebsgerät: Drehknopf Reizintensität 2 (Stimulus für AUS): 100%

## Durchführung 1

PHYWE



- Messung starten.
- Reiztaste 1 etwa 5 Sekunden lang drücken. Warten bis die Spannung den Ausgangswert erreicht hat.
- Gelbes Kabel in der schwarzen Buchse in Reizkanal 1 jetzt in die schwarze Buchse von Kanal 2 stecken (roter Pfeil in der Abbildung).
- Reiztaste 2 ca. 5 Sekunden lang drücken. Warten bis die Spannung den Ausgangswert erreicht hat.
- Reiztasten 1 und 2 ca. 5 Sekunden lang drücken. Warten bis die Spannung den Ausgangswert erreicht hat.
- Messung beenden, sobald die Spannung den Anfangswert erreicht hat.
- Ergebnisse speichern und auswerten.

PHYWE

## Auswertung 1

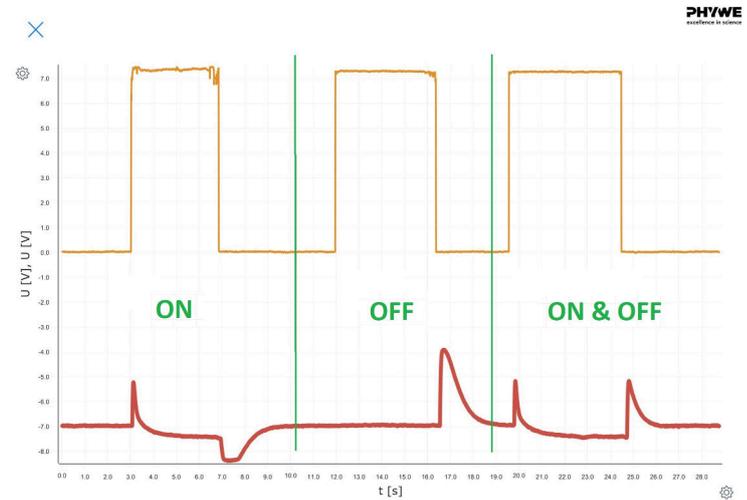


## Ergebnis 1.1

PHYWE

**ON:** Es sind zwei Zellen beteiligt, die Ganglienzelle und die amakrine Zelle, die ein Signal an die inhibitorischen Synapsen der Ganglienzelle weiterleitet. Die unteren Zellen erhalten einen Reiz an einer ihrer erregenden Synapsen. Das Membranpotenzial der Ganglienzelle wird bestimmt.

Zu Beginn des Signals wird die Membran der Ganglienzelle kurzzeitig depolarisiert, was zu einer Abnahme des Membranpotenzials führt. Aufgrund der Aktivität der hemmenden Synapsen kann eine Hyperpolarisation beobachtet werden.



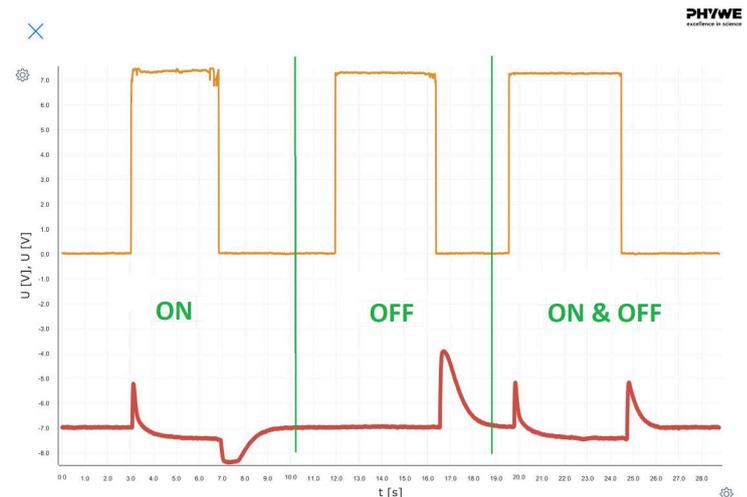
## Ergebnis 1.2

PHYWE

**OFF:** Es sind zwei Zellen beteiligt: die Ganglienzelle und die amakrine Zelle, die ein Signal an die Veto-Synapsen der Ganglienzelle weiterleitet. Beide Zellen erhalten einen Reiz an ihren erregenden Synapsen. Das Membranpotenzial der Ganglienzelle wird bestimmt.

Zu Beginn des Signals geschieht nichts. Die Membran der Ganglienzelle wird jedoch depolarisiert, sobald der Reiz abgeschaltet wird.

**ON & OFF:** Kombiniert die Einstellungen von ON- und OFF-Neuronen.



## Theorie 2

PHYWE

### Neuronaler Oszillator (innere Uhr)

Viele tierische und menschliche Verhaltensweisen weisen rhythmische Merkmale auf. Die Periodizität dieser Rhythmik, die im zentralen Nervensystem entsteht, kann sich über Monate (z. B. jahreszeitlicher Rhythmus), Tage (z. B. hormoneller Rhythmus), Stunden (z. B. Schlaf-Wach-Zyklus) oder Sekunden (z. B. die rhythmische Bewegung vieler Tiere) erstrecken. In jedem Fall sind neuronale Oszillatoren als Zeitgeber für ein solches Verhalten notwendig. Das Schaltungsbeispiel zeigt, wie einzelne Neuronen zu **oszillierendem Verhalten** gebracht werden können, wenn sie gruppiert werden. Das rhythmische Verhalten dieses neuronalen Netzwerks beruht auf der **zeitverzögerten negativen Rückkopplung über eine Veto-Synapse**. Dadurch wird das Eingangssignal in regelmäßigen Zeitabständen abgeschaltet. Aufgrund der Membranzeitkonstante des neuronalen Moduls (bedingt durch seine kapazitiven Eigenschaften) kommt es nicht zu einem abrupten Signalabfall. Mit einer Zeitverzögerung, die im Wesentlichen von der Signalstärke bestimmt wird, führt die kleine Erregung an der Veto-Synapse auch wieder zu einer so kleinen Hemmung, dass das Stimulationssignal wieder wirksam werden kann. D.h. die Hemmung an der Vetosynapse wird nach einiger Zeit zunehmender Hemmungsstärke so schwach, dass sie die Erregersynapse nicht mehr hemmen kann.

PHYWE



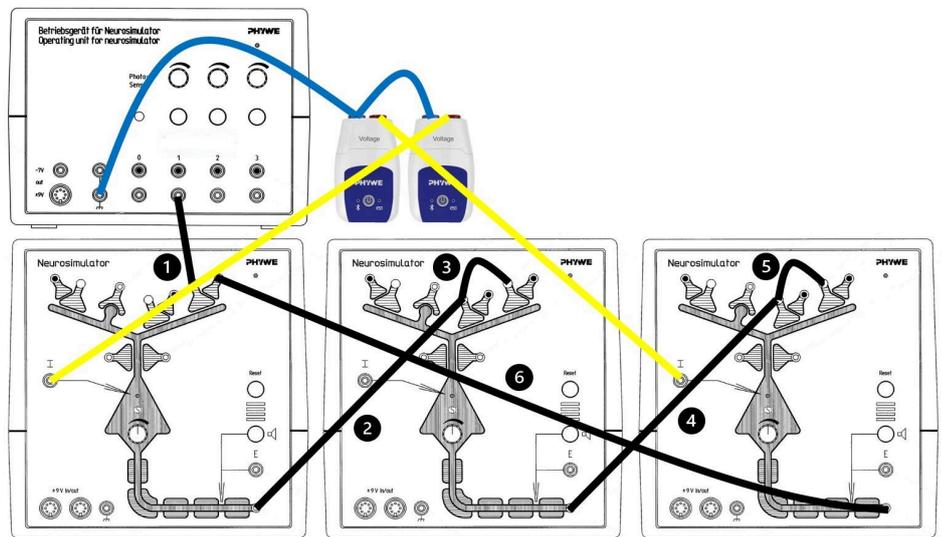
## Aufbau und Durchführung 2

## Aufbau 2.1

PHYWE

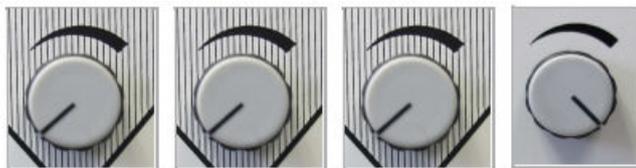
### 1. Neuronaler Oszillator:

Die Verschaltung so aufbauen wie in der Abbildung rechts gezeigt.



## Aufbau 2.2

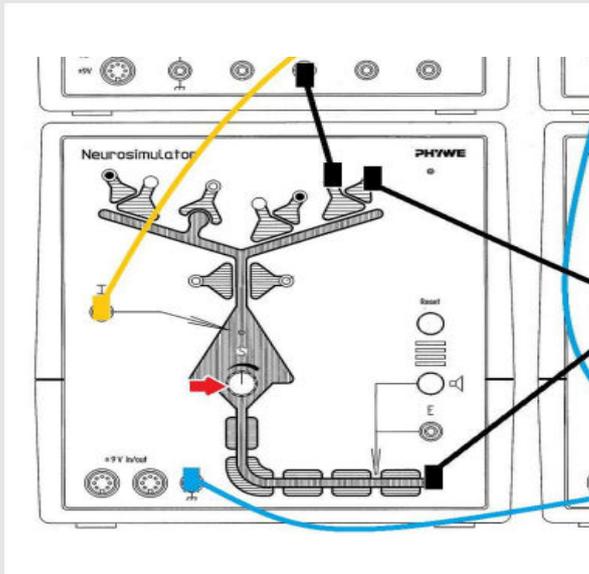
PHYWE



- Neurostimulator 1, 2 und 3: Drehknopf-Feuerschwelle: 0%
- Betriebsgerät: Drehknopf Reizintensität 1: 100%

## Durchführung 2.1

PHYWE



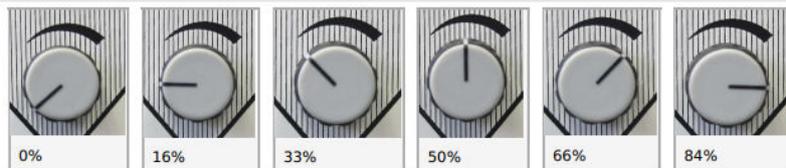
- Messung starten.
- Reiztaste 1 etwa 15 Sekunden lang drücken.
- Messung beenden, sobald die Spannung den Ausgangswert erreicht hat.
- Ergebnisse speichern und bewerten.

### 2. Einschwingverhalten mit verschiedenen Schwellenwerten am Neurosimulator 1

- Oszillation durch unterschiedliche Einstellungen des Schwellenwerts am Neurosimulator 1 verändern (Abbildung links, roter Pfeil).

## Durchführung 2.2

PHYWE



- Messung starten.
- Feuerschwelle ansteigend verändern. Reiztaste 1 jeweils ca. 5 Sekunden lang drücken. Warten bis die Spannung den Ausgangswert erreicht hat, dann erneut Feuerschwelle erhöhen, etc.
- Ergebnisse speichern und auswerten.

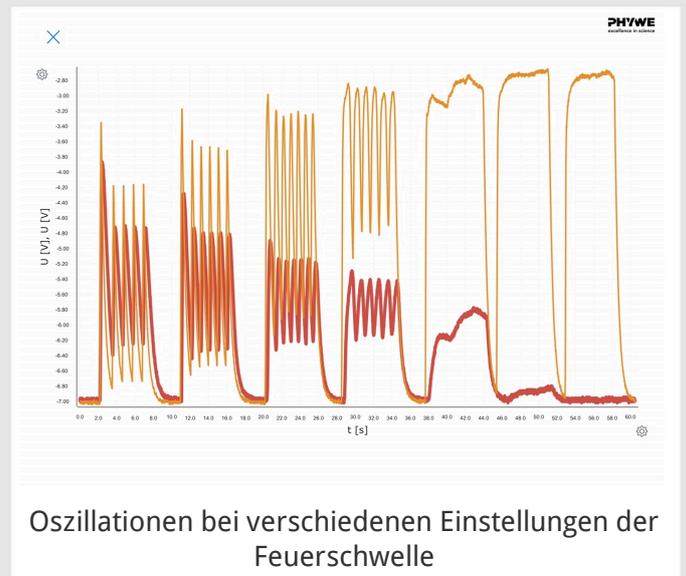
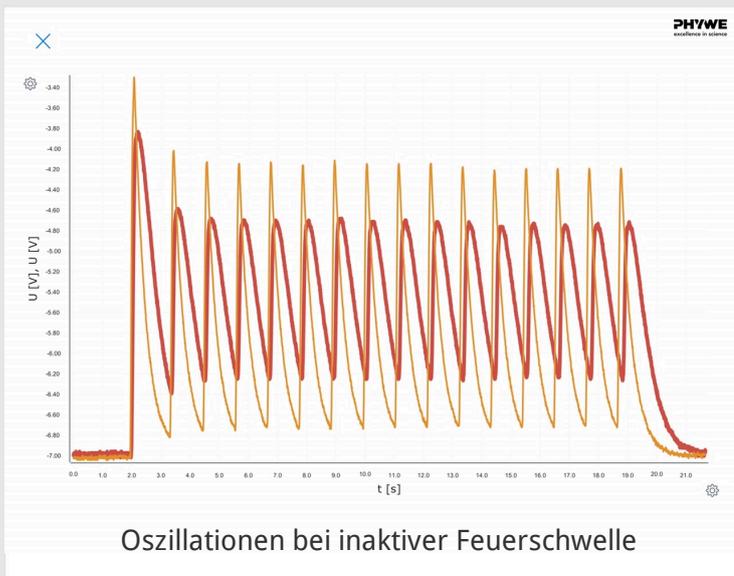
PHYWE



# Auswertung 2

## Ergebnisse 2

PHYWE



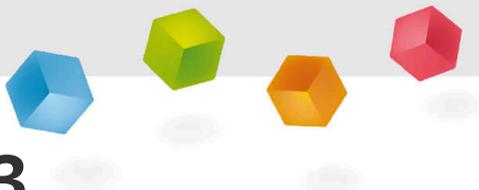
## Theorie 3

PHYWE

### Kreisende Erregung (Kurzzeitgedächtnis)

Diese innerhalb einer Neuronengruppe kreisende, sich selbst erhaltende Erregung ist beispielhaft für das Kurzzeitgedächtnis, denn ein Reiz bleibt in diesem Netz eine Zeit lang erhalten. Die Neurosimulatoren 1 (links) und 2 (in der Mitte) bilden eine positive Rückkopplungsschleife, d.h. sobald ein kurzer Reiz ausgelöst wurde, wird das Signal weiter übertragen. Der dritte Neurosimulator (rechts) fungiert als hemmendes Interneuron für Neurosimulator 2. Mit diesem Aufbau lassen sich verschiedene Variationen untersuchen, indem die Reizintensität und die Schwellenwerte der Neuronen 1 oder 2 und des hemmenden Interneurons verändert werden.

PHYWE



## Aufbau und Durchführung 3

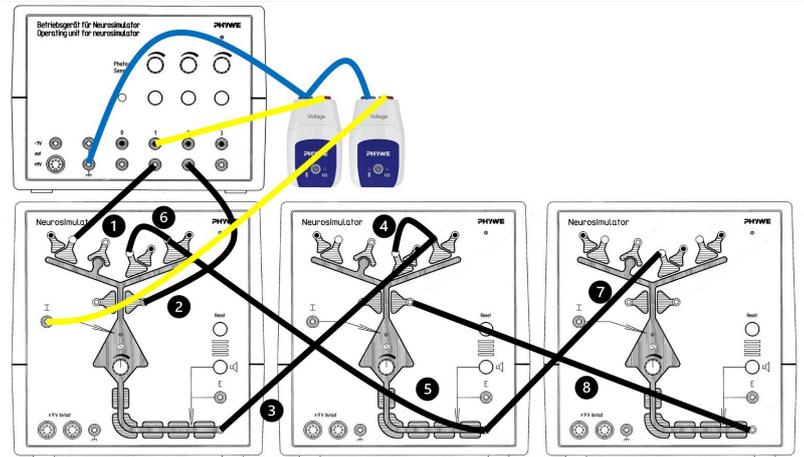
## Aufbau 3.1

PHYWE

Anmerkungen: Da jede Person Druckknöpfe auf eine etwas andere Art und Weise bedient, sollten, um eine ähnliche Signaldauer zu erhalten, alle Teile dieses Experiments von der gleichen Person durchgeführt werden.

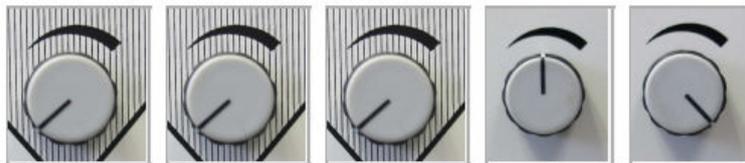
### 1. Veränderung der kreisenden Erregung: Veränderung der Reizdauer

Das Experiment wie in Abbildung rechts dargestellt aufbauen.



## Aufbau 3.2

PHYWE



- Neurosimulator 1, 2 und 3: Drehknopf-Feuerschwelle: 0%
- Betriebsgerät: Drehknopf Reizintensität 1: 50%
- Betriebsgerät: Drehknopf Reizintensität 2: 100%
- In der measureAPP "Zusätzliche Y-Achse"aktivieren

## Durchführung 3.1

PHYWE

### 1.1. Konvulsive Erregung

- Messung starten und Reiztaste 1 etwa eine Sekunde lang drücken.
- Messung beenden, sobald die Spannung den Ausgangswert erreicht hat.
- Variante: Messung wiederholen und die konvulsive Erregung durch Drücken der Reiztaste 2 beenden. Ergebnisse speichern und auswerten.

### 1.2. Dämpfung

- Messung starten und Reiztaste 1 **weniger** als eine Sekunde lang drücken (sehr kurzes Antippen, wie auf einer heißen Herdplatte).
- Messung beenden, sobald die Spannung den Ausgangswert erreicht hat, Ergebnisse speichern und auswerten.

## Durchführung 3.2

PHYWE

### 2. Veränderung der kreisenden Erregung: Veränderung der Reizintensität

- Messung starten.
- Reiztaste 1 weniger als eine Sekunde lang drücken (sehr kurzes Antippen, wie auf einer heißen Herdplatte).
- Messung beenden, sobald die Spannung den Ausgangswert erreicht hat. Ergebnisse speichern.
- Messung mehrere Male wiederholen. Dabei Reizintensität für jede Messung minimal ändern: Den Knopf für die Reizintensität 1 minimal drehen, beide Richtungen sind möglich. Ziel ist es, Messdiagramme mit konvulsiver Erregung und mit Dämpfung zu erhalten.
- Jedes Mal die Ergebnisse speichern und auswerten. Vor jeder Messung die konvulsive Erregung durch Drücken der Reiztaste 2 stoppen.

## Durchführung 3.3

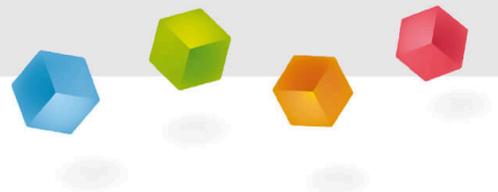
PHYWE

### 3. Veränderung der kreisenden Erregung: Inhibition

- Messung starten.
- Reiztaste 1 ca. eine Sekunde lang drücken.
- Reiztaste 2 drücken.
- Messung beenden, sobald die Spannung den Ausgangswert erreicht hat. Ergebnis speichern.

PHYWE

## Auswertung 3



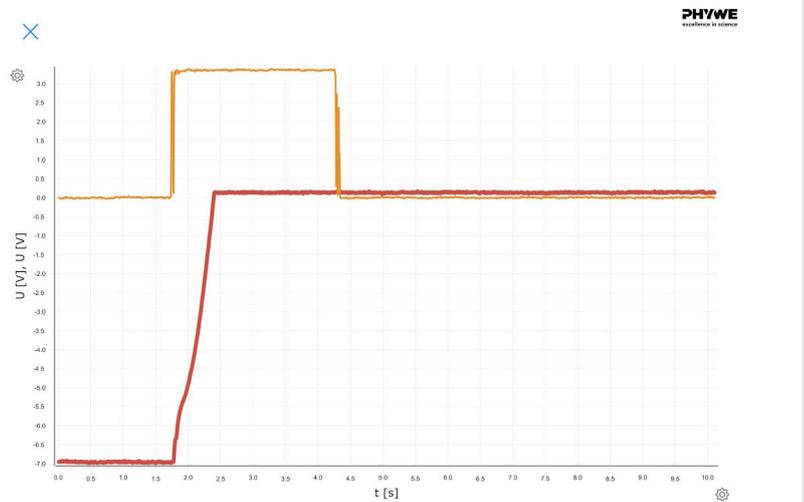
## Ergebnis 3.1.1

PHYWE

### 1. Variation der Rotationserregung: Variation der Reizdauer

#### 1.1 Konvulsive Erregung

Die Abbildung rechts zeigt das erste Beispiel für eine konvulsive Erregung (obere Kurve: Reiz, untere Kurve: Membranpotenzial von Nervenzelle 1).



## Ergebnis 3.1.2

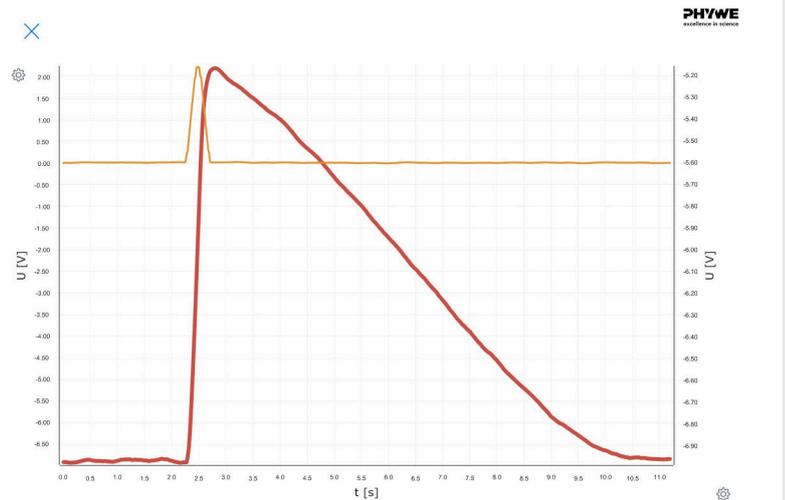
PHYWE

### 1.2. Dämpfung

Die Abbildung rechts zeigt ein Beispiel für die Dämpfung nach einem ganz kurzen Reiz.

In diesem Versuch ist der Reizkanal mittelstark, und es wird nur ein kurzer Reizimpuls gegeben. Die Nervenmembran wird depolarisiert, aber der Stimulus ist zu schwach, und das Membranpotenzial kehrt zur Grundlinie zurück.

Da der Schwellenwert des Interneurons niedrig ist, erhöht seine Hemmung die Dämpfung des Neuron-Neuron-Zyklus.



## Ergebnis 3.2

PHYWE

### 2. Veränderung der kreisenden Erregung: Veränderung der Reizintensität

Die Tabelle zeigt Beispiele für unterschiedliche Werte für konvulsive Erregung und Dämpfung in Abhängigkeit von Reizintensität und -dauer.

Number	signal intensity $U_{max}$	signal duration $t_2 - t_1$	convulsive excitation	dampening
1.	6.28	0.12	x	
2.	5.05	0.11	x	
3.	5.24	0.10	x	
4.	5.09	0.11	x	
5.	4.96	0.11		x
6.	4.95	0.11		x
7.	4.89	0.11		x
8.	5.08	0.09		x
9.	5.09	0.08		x
10.	3.65	0.10		x

## Ergebnis 3.3

PHYWE

### 3. Veränderung der kreisenden Erregung: Inhibition

Je nach Länge des inhibitorischen Reizes (roter Pfeil in der Abbildung rechts) klingt die konvulsive Erregung mehr oder weniger schnell ab.



## Theorie 4

PHYWE

### Großhirnrinde und sensorisches Lernen

Dieses Experiment zeigt, dass eine Rindenpyramidenzelle nur dann reizspezifisch reagieren kann, wenn sie dies durch eine vorangegangene Korrelation des sensorischen Signals mit einem unspezifischen Alarmsignal gelernt hat. Auf diese Weise werden nur wichtige Signale gespeichert und verarbeitet, und eine **Überlastung der Großhirnrinde** wird vermieden. Der Photosensor liefert das spezifische Signal eines Sinnesorgans, das eine **thalamische Zwischenhirnzelle** erregt, die wiederum die Hebbsche Synapse einer **Kortex-Pyramidenzelle** erregt. Die Kortex-Pyramidenzelle wird auch durch einen unspezifischen Reiz (Kanal 1) erregt. Gleichzeitig hemmt eine **Stellatumzelle** die Pyramidenzelle. Diese **drei Zelltypen** bilden die **Triade**. In der Großhirnrinde von Säugetieren findet die Verarbeitung von sensorischen Signalen und deren Verknüpfung mit motorischen Programmen statt. Darüber hinaus findet hier die **Speicherung von Erfahrungen** statt. In einem frühen Entwicklungsstadium befindet sich die Großhirnrinde in einem diffusen, ungeformten Zustand, in dem die Signalverarbeitung nicht mit der Präzision funktioniert, wie sie im erwachsenen Organismus gegeben ist. Diese Fähigkeit wird erst langsam in aktiver Auseinandersetzung mit der Umwelt erworben. Die Reizverarbeitung ist auch ein Ergebnis der **plastischen Anpassung**. Dabei ist immer eine Koinzidenz zwischen verschiedenen Reizen notwendig, um eine kortikale pyramidale Zelle zu erreichen und dort Hebbsche Synapsen durch anhaltende Potenzierung zu stabilisieren.

PHYWE



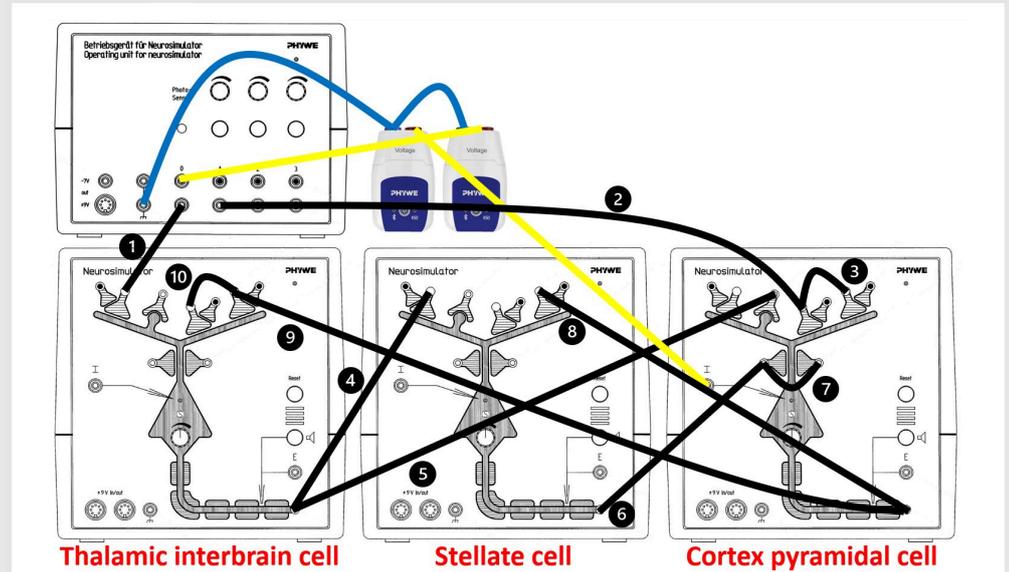
## Aufbau und Durchführung 4

## Aufbau 4.1

PHYWE

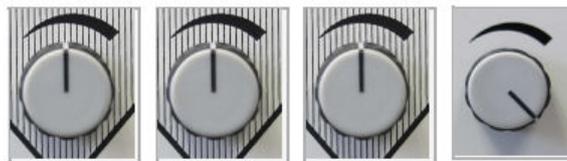
Den Versuch wie in der Abbildung rechts aufbauen.

Das gelbe Kabel ist zunächst an den Messkanal des **Fotosensors** angeschlossen.



## Aufbau 4.2

PHYWE

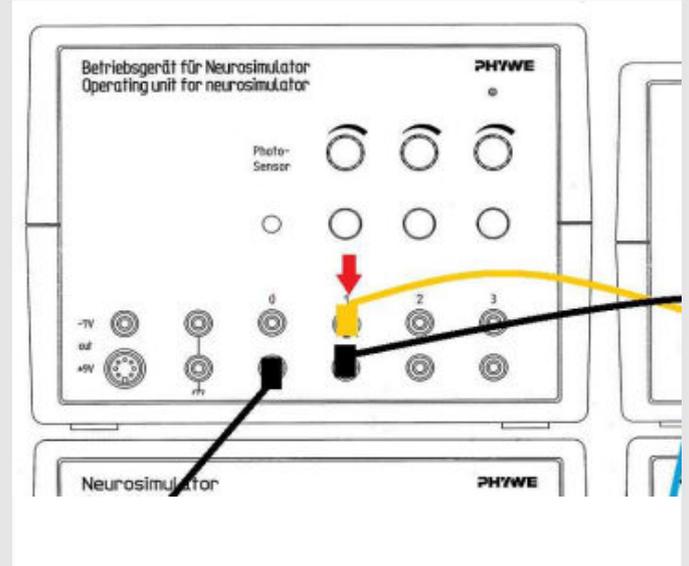


- Neurosimulator 1, 2, 3: Drehknopf Feuerschwelle: 50%
- Betriebsgerät: Drehknopf Reizintensität 1: 100%

## Durchführung 4.1

PHYWE

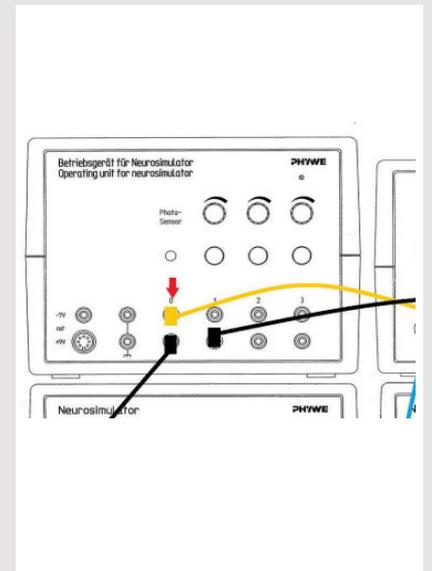
- Um die Hebb'sche Synapse auf die Standardwerte zu setzen, Reset-Taste am Neurosimulator 3 (Kortex-Pyramidenzelle) drücken.
- Das gelbe Kabel steckt im Messkanal des **Fotosensors**.
- Messung starten.
- Fotosensor für 3 Sekunden abdecken. Warten bis die Spannung den Ausgangswert erreicht hat.
- Gelbes Kabel an **Reizkanal 1** umstecken (roter Pfeil in der Abbildung rechts).



## Durchführung 4.2

**PHYWE**  
 excellence in science

- Reiztaste 1 ca. 3 Sekunden lang drücken. Warten bis die Spannung den Ausgangswert erreicht hat. Das gelbe Kabel wieder an den Messkanal des **Fotosensors** anschließen (roter Pfeil in der Abbildung rechts).
- Fotosensor abdecken und Reiztaste 1 (gleichzeitig) 60 Sekunden lang drücken. Warten bis die Spannung den Ausgangswert erreicht hat.
- Fotosensor 3 Sekunden lang abdecken. Warten bis die Spannung den Ausgangswert erreicht hat. Messung beenden, Ergebnisse speichern und auswerten.
- Um die Hebb'sche Synapse wieder auf den Standardwert zu setzen, Reset-Taste am Neurosimulator 3 (Kortex-Pyramidenzelle) drücken.



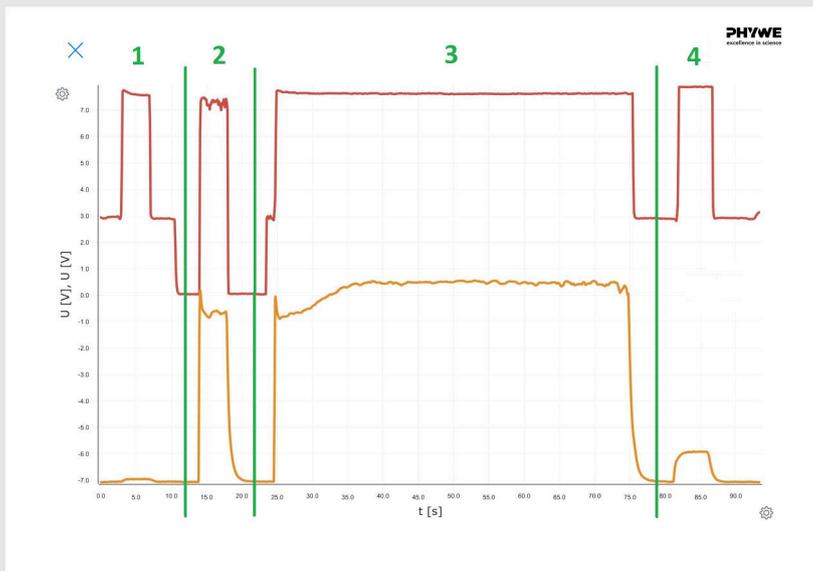
PHYWE



## Auswertung 4

### Ergebnis 4

PHYWE



Die Erregung durch den spezifischen Reiz (Photosensor, Messbereich 4) nach der gleichzeitigen Betätigung des Photosensors und der Reiztaste 1 ist größer als im Messbereich 1 und klingt langsamer ab als die Erregung durch die Reiztaste 1 im Messbereich 2.

Folgerung: Eine Kortexpyramidenzelle (Messbereich 1) kann nur dann reizspezifisch reagieren (Messbereich 4), wenn sie dies durch eine vorangegangene Korrelation des sensorischen Signals mit einem unspezifischen Alarmsignal (Messbereich 3) gelernt hat.

## Theorie 5

PHYWE

### Richtungsselektivität durch unilaterale Inhibition

Beispiele: Viele Nervenzellen in sensorischen Systemen sind richtungsselektiv. So reagieren z.B. bestimmte Ganglienzellen in der Netzhaut nur, wenn sich ein Lichtreiz in eine bestimmte Richtung bewegt, nicht aber bei Bewegungen in die entgegengesetzte Richtung. Ein ähnliches Verhalten ist auch für den Tastsinn bekannt. Diese neuronale Schaltung lässt sich durch eine Schaltung mit einseitiger Hemmung zwischen zwei Reizkanälen, die nacheinander aktiviert werden, simulieren. Lokale Projektions-Sinnesorgane, z.B. die Netzhaut des Auges oder die Körperoberfläche mit ihren Tastrezeptoren, sind grundsätzlich in der Lage, Bewegungen (zeitliche Lageveränderungen) zu kodieren. Dementsprechend findet man in diesen Sinneskanälen auch tatsächlich Neuronen, die selektiv auf Reizbewegungen reagieren (siehe auch On-off-Response). Einige dieser Zellen reagieren nicht einfach auf jede Bewegung, sondern sprechen nur auf bestimmte Bewegungsrichtungen an, während andere Richtungen unbeantwortet bleiben. Ihre Reaktionsintensität ist in der Regel eine Funktion der Bewegungsgeschwindigkeit, der Bewegungsrichtung und - meist in geringem Ausmaß - der Intensität des bewegten Reizes. Solche Zellen finden sich bereits in der Netzhaut der meisten Wirbeltiere, aber nur bei wenigen von ihnen auf einer höheren Verarbeitungsebene (z.B. Anthrozoidea).

PHYWE



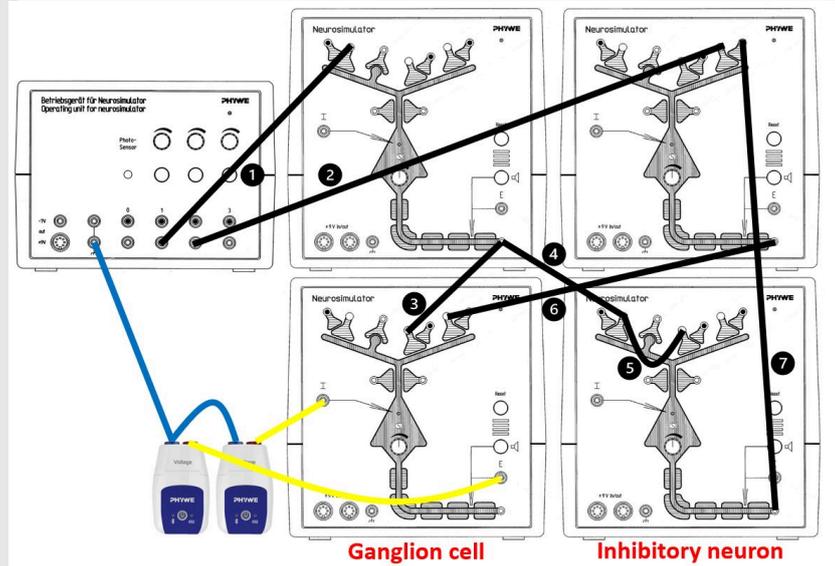
## Aufbau und Durchführung 5

## Aufbau 5.1

PHYWE

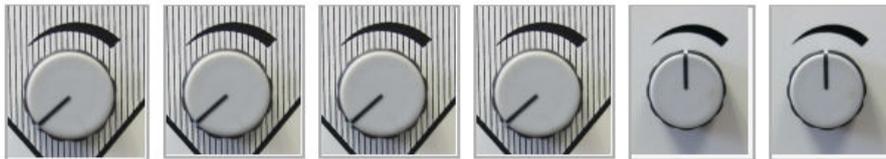
Das Experiment wie in der Abbildung gezeigt aufbauen.

Der Messkanal für die Aktionspotenziale in der Ganglienzelle kann mit einem Oszilloskop verbunden werden. Alternativ können beide Spannungssensoren per USB an einen Computer angeschlossen werden, um die Messfrequenz zu erhöhen (pro Kanal 5000 Hz statt 500 Hz bei Bluetooth-Betrieb). Am einfachsten lässt sich der Versuch allerdings durchführen, wenn man für die Darstellung der Aktionspotenziale den akustischen Monitor verwendet.



## Aufbau 5.2

PHYWE



- Neurosimulator 1, 2, 3, 4: Drehknopf Feuerschwelle: 0%
- Betriebsgerät: Drehknopf Reizintensität 1 und 2: je 50%

## Durchführung 5

PHYWE

- Nur den akustischen Monitor der Ganglienzelle (Neurosimulator 4) aktivieren.
- Anschließend durch Aussenden eines Reizes nur von Reizkanal 1 den Schwellenwert der Ganglienzelle erhöhen, so dass kein Aktionspotenzial hörbar ist (akustischer Monitor der Ganglienzelle). Prüfen ob ein Aktionspotenzial hörbar ist, wenn Reizkanal 2 aktiviert wird. Es sollte kein akustisches Signal zu hören sein.
- Teil 1: Messung starten. **Reiztaste 1** drücken und unmittelbar danach (fast gleichzeitig) die **Reiztaste 2**. Messung beenden. Ergebnisse speichern und auswerten.
- Teil 2: Messung starten. **Reiztaste 2** drücken und unmittelbar danach (fast gleichzeitig) die **Reiztaste 1**. Messung beenden. Ergebnisse speichern und auswerten.

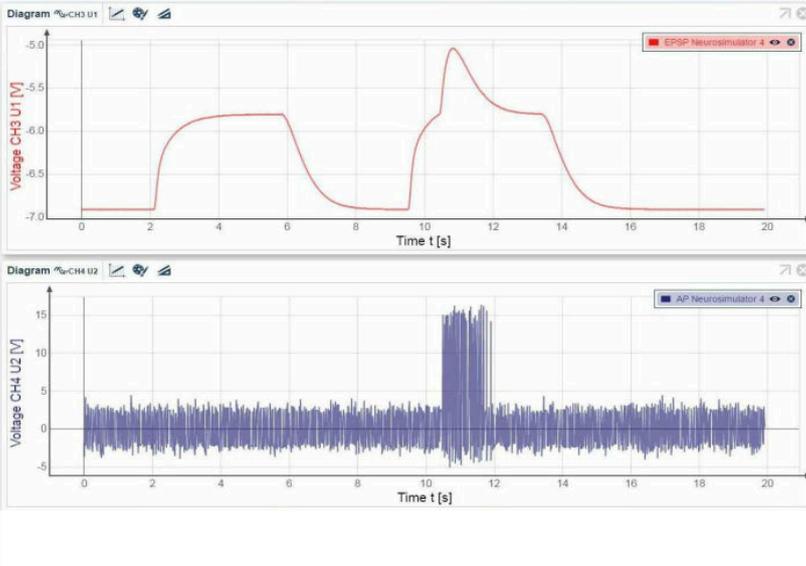
PHYWE



## Auswertung 5

## Ergebnis 5.3

PHYWE



Messung mit der ebenfalls verwendbaren measureLAB-Software.

Nur im zweiten Teil der Messung wird ein Aktionspotenzial (AP) erzeugt, die Folge der Richtungsselektivität.

## Theorie 6

PHYWE

### Selbstkalibrierung paariger Sinneskanäle

Beispiel: Die embryonale Bildung achsensymmetrischer Arten ist nicht perfekt, was zu leichten Unregelmäßigkeiten in der Symmetrie führt. Unregelmäßigkeiten der Sinnesepithelien, z. B. im Gleichgewichtsorgan, können durch das Nervensystem ausgeglichen werden: Das Hebbsche Prinzip bietet die Möglichkeit, die Ausgangssignale so anzupassen, dass sie symmetrisch sind, wenn die Sinnesorgane asymmetrisch sind.

Experimenteller Aufbau: Es gibt zwei sensorische Neuronen und zwei Interneuronen (zwei sensorische Neuronen-Interneuronenpaare). Asymmetrische Signale werden von Reizkanal 2 und Reizkanal 3 an die Hebbschen Synapsen der beiden sensorischen Neuronen gesendet (hier: Reizintensität 50% bzw. 100%). Ein vom Reizkanal 1 der Betriebseinheit herrührendes Signal wird an die beiden Interneuronen gesendet, die das Signal über ihr efferentes Axon an ihr sensorisches Neuronenpaar weiterleiten, wo das Signal durch Verzweigung verstärkt wird. Beide sensorischen Neuronen hemmen ihre eigenen Interneuronen.

PHYWE

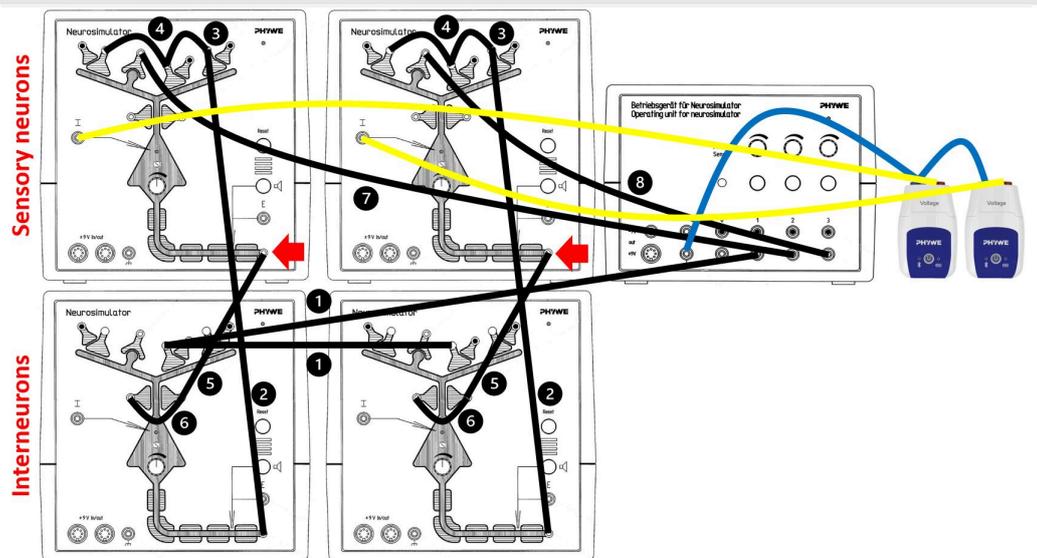
# Aufbau und Durchführung 6

## Aufbau 6.1

PHYWE

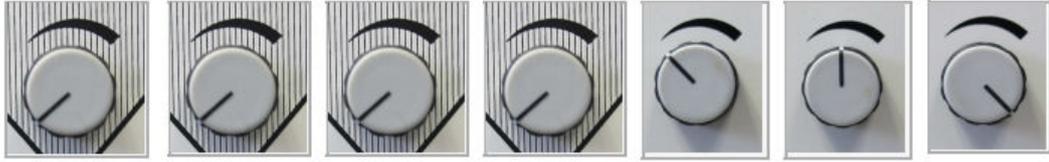
### Selbstkalibrierung paariger Sinneskanäle:

- Die Verschaltung so aufbauen wie in der Abbildung rechts gezeigt.
- Bei der zweiten Messung eine der beiden mit den roten Pfeilen markierten Kabel aussteckt lassen.



## Aufbau 6.2

PHYWE



- Neurosimulator 1, 2, 3, 4: Drehknopf-Feuerschwelle: 0%
- Betriebsgerät: Drehknopf Reizintensität 1: 33%
- Betriebsgerät: Drehknopf Reizintensität 2: 50%
- Betriebsgerät: Drehknopf Reizintensität 3: 100%

## Durchführung 6.1

PHYWE

### Selbstkalibrierung paariger Sinneskanäle

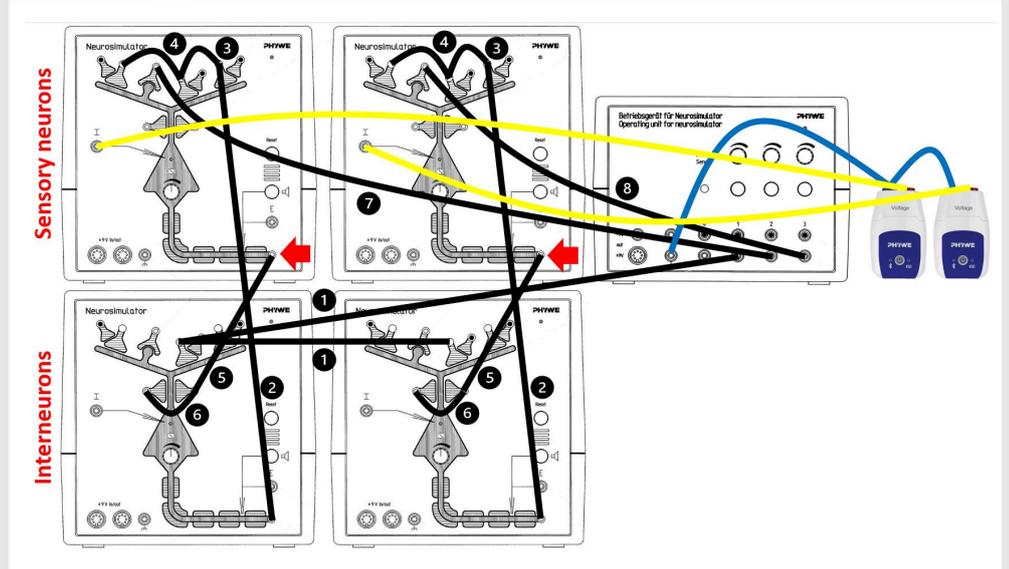
- Messung starten.
- Reiztaste 1 drücken, 1 bis 2 Sekunden warten, Taste gedrückt halten und zusätzlich gleichzeitig die Reiztasten 2 und 3 drücken.
- Die drei Reiztasten gleichzeitig längere Zeit gedrückt halten (z.B. 30 Sekunden).
- Messung beenden, wenn die Spannung den Ausgangswert erreicht hat.
- Ergebnisse speichern und auswerten.

## Durchführung 6.2

PHYWE

### Keine Selbstkalibrierung

- Eines der mit einem roten Pfeil gekennzeichneten Kabel aus der schwarzen Buchse entfernen.
- Ansonsten gleiche Vorgehensweise wie beim Versuch "Selbstkalibrierung paariger Sinneskanäle".



PHYWE

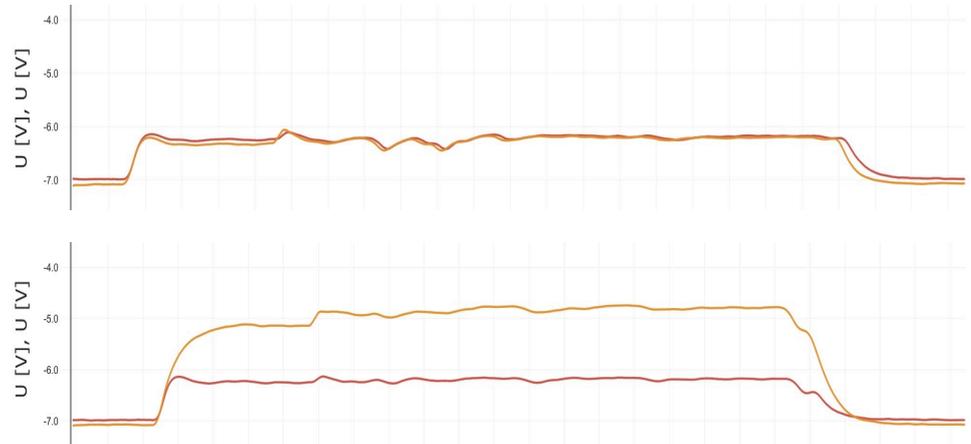
## Auswertung 6



## Ergebnis 6.1

PHYWE

Abbildung: Beispiele für die Messung **mit** (oben) und **ohne** (unten) Selbstkalibrierung von gepaarten sensorischen Kanälen. Messdauer 25 Sekunden.



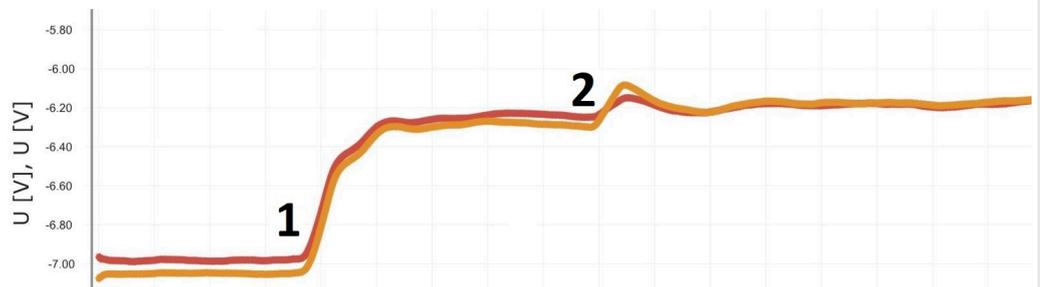
## Ergebnis 6.2

PHYWE

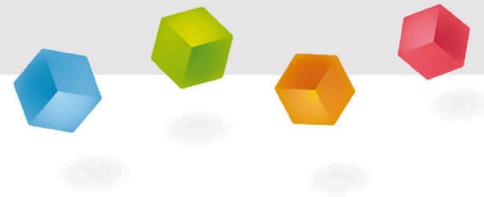
Die Abbildung rechts zeigt den Beginn der Selbstkalibrierung:

**Aktion 1:** Drücken der Reiztaste 1

**Aktion 2:** Reiztaste 1 bleibt gedrückt, zusätzliches gleichzeitiges Drücken der Reiztasten 2 und 3



PHYWE



## Ausblick

## Ausblick

PHYWE

### Zusätzliche neuronale Netze

Mit Daten aus verschiedenen Forschungsprojekten können weitere Schaltkreise erstellt werden. Ein Internet-Suchbegriff wie z.B. "synaptische Potenzierung" liefert eine beträchtliche Menge an wissenschaftlichen Arbeiten. Deren neuronale Modelle können in Neurosimulator-Schaltungen umgewandelt werden.

Bitte beachten Sie, dass Sie bei Verwendung von 4 Neurosimulatoren ein weiteres Betriebsgerät zur Stromversorgung der zusätzlichen Neurosimulatoren brauchen, pro 4 Neurosimulatoren also 1 zusätzliches Betriebsgerät.



Drawing by Santiago Ramón y Cajal (1852 - 1934)