

# **Versuch F09**

## **Neuromorphic Computing**

Xeno Boecker, Jan Jakob

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Untersuchung eines einzelnen Neurons</b>	<b>1</b>
1.1	Aufgabe 1 . . . . .	1
1.2	Aufgabe 2 . . . . .	1
1.3	Aufgabe 3 . . . . .	1
1.4	Aufgabe 4 . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Kalibrierung der Neuron-Parameter</b>	<b>4</b>
2.1	Aufgabe 1 . . . . .	4
2.2	Aufgabe 2 . . . . .	4
2.3	Aufgabe 3 . . . . .	4
2.4	Aufgabe 4 . . . . .	5
2.5	Aufgabe 5 . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Einzelnes Neuron mit synaptischem Input</b>	<b>6</b>
3.1	Aufgabe 1 . . . . .	6
3.2	Aufgabe 2 . . . . .	7
3.3	Aufgabe 3 . . . . .	7
3.4	Aufgabe 4 . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Kurzzeit-Plastizität</b>	<b>8</b>
4.1	Aufgabe 1 . . . . .	8
4.2	Aufgabe 2 . . . . .	8
4.3	Aufgabe 3 . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Feed-Forward Netzwerke</b>	<b>9</b>
5.1	Aufgabe 1 . . . . .	9
5.2	Aufgabe 2 . . . . .	9
5.3	Aufgabe 3 . . . . .	9
<b>6</b>	<b>Rekurrente Netzwerke</b>	<b>10</b>
6.1	Aufgabe 1 . . . . .	10
6.2	Aufgabe 2 . . . . .	10
6.3	Aufgabe 3 . . . . .	10
<b>7</b>	<b>Eine einfache Berechnung - XOR</b>	<b>11</b>
7.1	Aufgabe 1 . . . . .	11
7.2	Aufgabe 2 . . . . .	11
7.3	Aufgabe 3 . . . . .	11
7.4	Aufgabe 4 . . . . .	11

## 1 Untersuchung eines einzelnen Neurons

Im ersten Experiment untersuchen wir das Zündverhalten eines einzelnen Neurons ohne Input / äußere Stimuli. Das Neuron kann in einen kontinuierlichen Feuerzustand versetzt werden, wenn das Leck-Umkehrpotential die Zündschwelle übersteigt.

### 1.1 Aufgabe 1

Im Folgenden zeichnen wir ein Ersatzschaltbild eines Neurons in der beschriebenen Konfiguration. Dazu nehmen wir das Neuronenschema in Abbildung 5 als Referenz und stellen uns das Neuron als einen Kondensator vor, der an mehrere Spannungsquellen angeschlossen ist. Die verschiedenen Ionenkanäle der Nervenzelle werden zu einem einzigen erregenden und einem einzigen hemmenden Potenzial zusammengefasst, und die Diffusion durch die Membran wird durch das Leckpotential ersetzt.

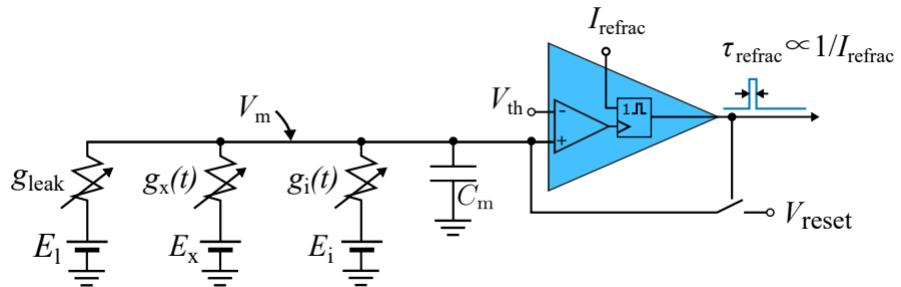


Abbildung 1: Ersatzschaltbild eines Neurons in der beschriebenen Konfiguration

**Frage:** Welche Parameter des Neurons beeinflussen die Feuerrate?

1. Refraktärzeit  $\tau_{\text{refrac}}$
2. Membranzeitkonstante  $\tau_m = \frac{C_m}{g_l}$
3. Schwellwert- und Resetspannung  $V_{\text{th}}, V_{\text{reset}}$

### 1.2 Aufgabe 2

Bei dieser Aufgabe haben wir nur wie in der Versuchsanleitung beschrieben Vorbereitungen getroffen und die aktuelle Shell für die Verwendung von Spikey eingerichtet.

### 1.3 Aufgabe 3

Auf dem Spikey-Chip wird ein einzelnes Neuron mit folgenden Parametern konfiguriert:

Tabelle 1: Parameter für ein einzelnes Neuron

Parameter	Wert
$V_{\text{reset}}$	-80.0mV
$E_{\text{rev}_I}$	-75.0mV
$V_{\text{rest}}$	-50.0mV
$V_{\text{thresh}}$	-55.0mV
$g_{\text{leak}}$	20.0

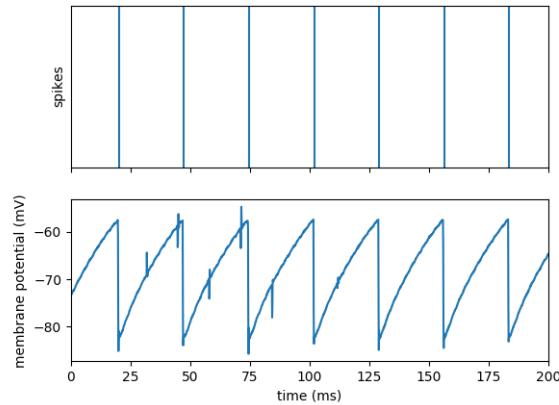
Der Potentialverlauf ist in Abbildung ?? dargestellt. Wir lesen für die Werte  $V_{\text{reset}}$  und  $V_{\text{th}}$  folgende Werte ab:

Tabelle 2: Abgelesene Werte aus dem Verlauf des Membranpotentials

Parameter	Wert
$V_{reset}$	$-83.0 \pm 3.0\text{mV}$
$V_{thresh}$	$-56.0 \pm 3.0\text{mV}$

Die Werte liegen jeweils im  $3\sigma$ -Bereich.

Abbildung 2: Verlauf des Membranpotentials



## 1.4 Aufgabe 4

Durch Einsatz des Oszilloskops bestimmen wir die durchschnittliche Feuerrate des Neurons und ihre Standardabweichung mit Hilfe der Mess- und Statistikfunktion. Wir erhalten folgende Ergebnisse:

$$f_{firing} = 355.4 \pm 3.4\text{kHz}$$

Abbildung 3: durchschnittliche Feuerrate durch Einsatz des Oszilloskops



Wir berechnen die mittlere Feuerrate der im Spikes-Array empfangenen Spikes und vergleichen sie mit der Messung des Oszilloskops. Um eine Verteilung der Interspike-Intervalle (ISI) zu erhalten, berechnen wir die paarweise Differenz der empfangenen Spike-Zeiten und speichern sie in einem neuen Array. Den Mittelwert dieser Differenzen und seine Standardabweichung berechnen wir mit den entsprechenden NumPy-Funktionen.

# 1 Untersuchung eines einzelnen Neurons

Listing 1: Berechnung der mittleren Feuerrate

---

```
# time differences
timeDifferences = np.diff(spikes)

print("time_differences_mean", np.mean(timeDifferences))
print("time_differences_std_deviat", np.std(timeDifferences))

print("firing_rate_mean", 1e4 / np.mean(timeDifferences))
print("firing_rate_std_deviat", 1e4 / np.std(timeDifferences))
```

---

Damit erhalten wir in Übereinstimmung mit der obig bestimmten Feuerrate einen Wert von

$$f_{firing} = 356.5 \pm 4.7 \text{kHz}.$$

Den Faktor  $1e4$  benötigen wir zur Umrechnung von biologischen Zeitskalen auf Chip-Zeitskalen.

## 2 Kalibrierung der Neuron-Parameter

Durch Produktionsschwankungen bei der Herstellung des Chips kommt es zur sogenannten fixed pattern noise, was dazu führt, dass die Neuronen und die Synapsen-Parameter über den Chip variieren. Dies lässt sich durch Kalibrationsroutinen minimieren, was hier am Beispiel der Membranzeitkonstante  $\tau_m$  durchgeführt wird.

### 2.1 Aufgabe 1

Zunächst berechnen wir die theoretische Feuerrate aus den voreingestellten Werten. Nach Gleichung (6) aus der Versuchsanleitung gilt:

$$I_m(t) = C_m \frac{dV_m(t)}{dt} = g_l(E_l - V_m(t)) \quad (1)$$

Nach Lösen der DGL erhält man:

$$V_m(t) = E_{leak} + (V_{res} - E_{leak}) \cdot e^{-\frac{1}{\tau_m t}} \quad (2)$$

Es soll nun

$$V_m(t) = V_{thresh} \quad (3)$$

gelten. Mit den Werten aus dem Python Skript erhält man nach Umformen von (3) nach t einen Wert von:

$$f_{firing} = -52.86 \text{Hz}$$

Die dabei verwendeten Werte für  $V_{thresh}$  usw. entsprechen den in Versuchsteil 1 verwendeten Werten und können Tabelle 1 entnommen werden.

### 2.2 Aufgabe 2

Wir setzen den Schwellwert gerade auf den 1/e-ten Teil über  $V_{reset}$ , damit ist dieser nach  $\tau_m$  erreicht. Eine Periode hat also gerade die Dauer  $\tau_m + \tau_{refrac}$ .

$$V_m(t = 1/\tau_m) = V_{thresh} = E_{leak} + (V_{res} - E_{leak}) \cdot e \quad (4)$$

Stellen wir Gleichung (4) nach  $V_{thresh}$ , so erhalten wir

$$V_{thresh} = E_{leak} - 1/e \cdot (E_{leak} - V_{reset}), \quad (5)$$

in Übereinstimmung mit Gleichung (8) aus der Versuchsanleitung. Mit den Parametern aus dem Skript ergibt sich ein neuer Wert von

$$V_{thresh} = -51.69 \text{mV}. \quad (6)$$

### 2.3 Aufgabe 3

Wir ändern die Einstellung für  $V_{thresh}$  im Skript entsprechend und führen das Skript aus. Außerdem stellen wir die Oszilloskop-Aufzeichnung so ein, dass alle 4 Membranspannungen zu sehen sind (Abbildung ??). Wir verwenden die Messfunktionen des Oszilloskops, um gleichzeitig die Feuerfrequenz der vier angeschlossenen Neuronen zu messen. Außerdem aktivieren wir die Statistikfunktion, damit das Oszilloskop Mittelwerte und Standardabweichung berechnet. Wir erhalten folgende Werte:

Tabelle 3: Feuerrate der vier Neuronen

Neuron	Feuerrate
1	$377.4 \pm 36.8 \text{kHz}$
2	$343.8 \pm 39.6 \text{kHz}$
3	$446.7 \pm 24.8 \text{kHz}$
4	$218.8 \pm 73.9 \text{kHz}$

## 2 Kalibrierung der Neuron-Parameter

Abbildung 4: Membranspannungen bei vier verschiedenen Neuronen



### 2.4 Aufgabe 4

Über die Variation der Leitfähigkeiten  $g_{leak}$  kann die Feuerrate verändert werden. Wir kalibrieren die 4 Neuronen für eine identische Feuerrate und damit identische Membranzeitkonstante, indem wir einen neuen Leckleitwert  $g'_{leak}$  für jedes Neuron einstellen. Zur Berechnung von  $g'_{leak}$  verwenden wir folgende Überlegung:

$$\begin{aligned} f_{firing} &= g_{leak}/C_m \\ f_{firing}' &= g_{leak}/C_m * 1/g_{leak} * g'_{leak} \\ &= f_{firing}/g_{leak} * g'_{leak} \\ g'_{leak} &= f_{firing}' / f_{firing} * g_{leak} \end{aligned}$$

Setzen wir die entsprechenden Werte ein, so erhalten wir:

Tabelle 4: Neue  $g'_{leak}$  Werte der vier Neuronen

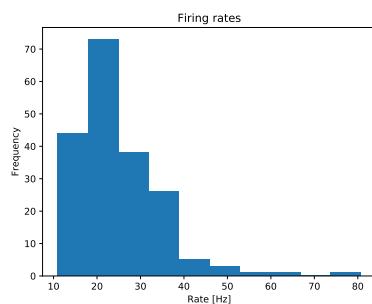
Neuron	$g'_{leak}$
1	145.6nS
2	90.8nS
3	115.1nS
4	107.5nS

Die Schwankungen kommen von Herstellungsungenauigkeiten (fixed pattern noise). Zudem ist uns aufgefallen, dass es eine gewisse trial to trial Variabilität gab (durch elektrisches und thermisches Rauschen).

### 2.5 Aufgabe 5

Wie man sehen kann, erhält man eine asymmetrische Verteilung, die Poissonartig aussieht. Dies ist in sehr guter Übereinstimmung mit dem Histogramm aus der Versuchsanleitung.

Abbildung 5: Histogramm der Membranzeitkonstanten von 192 unkalibrierten Neuronen



### 3 Einzelnes Neuron mit synaptischem Input

In dieser Aufgabe bewerten wir den Einfluss des synaptischen Inputs auf das Neuron.

#### 3.1 Aufgabe 1

Die Parameter drvifall und drviout werden variiert, dabei wird beobachtet, dass die EPSP-Kurve für kleine Werte von drvifall schneller abfällt und der Peak wird größer. Für kleinere Werte von drviout wird der Peak hingegen leicht kleiner und die EPSP-Kurve fällt minimal langsamer ab.

Abbildung 6: EPSP mit Parametern drvifall=1.5, drviout=1.6

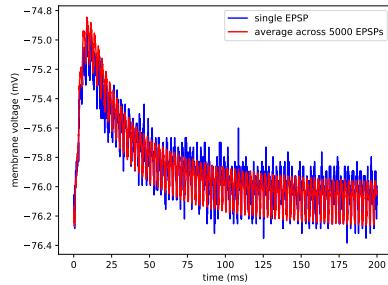


Abbildung 7: EPSP mit Parametern drvifall=0.1, drviout=1.6

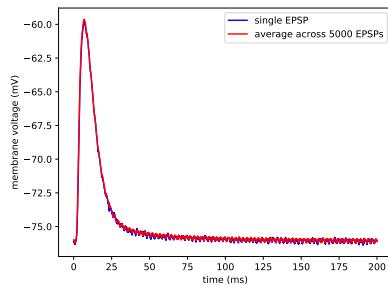
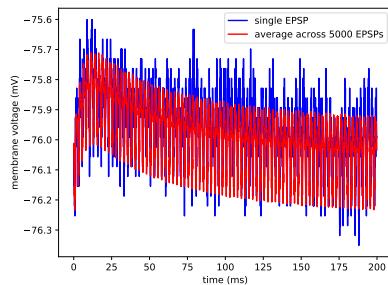


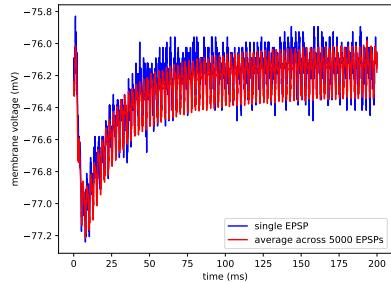
Abbildung 8: EPSP mit Parametern drvifall=1.5, drviout=0.3



### 3.2 Aufgabe 2

Wie erwartet ist der Peak umgekehrt. Das Verhalten der beiden Parameter drvifall und drviout ist hingegen unverändert im Vergleich zum EPSP.

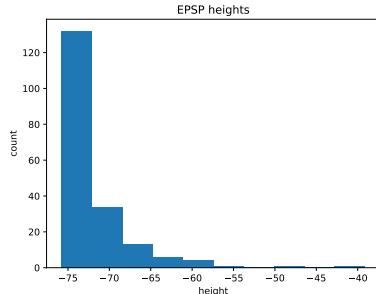
Abbildung 9: IPSP mit Parametern drvifall=1.5, drviout=1.6



### 3.3 Aufgabe 3

Wir untersuchen das fixed-pattern noise zwischen verschiedenen Synapsen. Hierzu werden von 192 Synapsen gemittelte EPSP-Läufe aufgenommen und deren Höhe bestimmt. Die Verteilung ist als Histogramm in Abbildung ?? zu sehen. Die berechnete Varianz der EPSP-Höhen beträgt  $\sigma^2 = 23.14mV^2$ .

Abbildung 10: Histogramm der EPSP-Höhen von 192 Synapsen



### 3.4 Aufgabe 4

## **4 Kurzzeit-Plastizität**

**4.1 Aufgabe 1**

**4.2 Aufgabe 2**

**4.3 Aufgabe 3**

## 5 Feed-Forward Netzwerke

In diesem Versuchsteil wird erstmals ein neuronales Netz am Beispiel einer vorwärts gerichteten Synfire Chain untersucht. Der Aufbau erfolgt gemäß Abbildung ???. Die Kettenglieder sind Populationen und bestehene aus einer gewissen Anzahl Neuronen. Jede Population ist jeweils mit der nächsten Population verbunden. Eine Gruppe (Spalte) feuert dabei immer synchron. Die inhibitorischen Neuronen verhindern ein Doppelfeuern der exzitatorischen.

Abbildung 11: Schematische Darstellung einer Synfire-Kette mit Feed-Forward-Hemmung. Erregende und hemmende Neuronen sind rot bzw. blau gefärbt

---

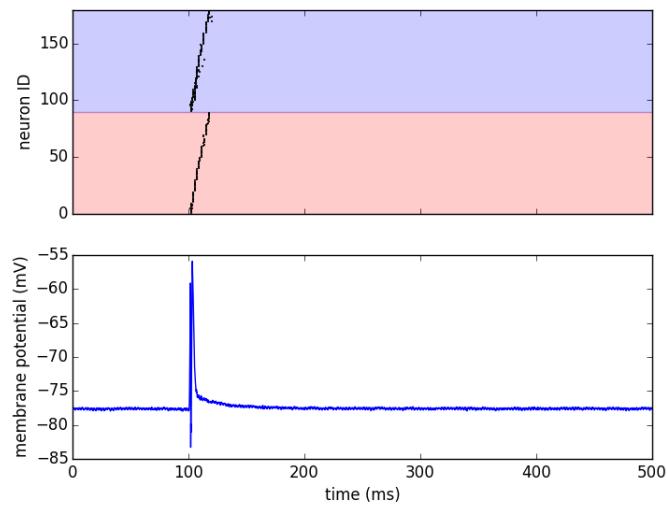


### 5.1 Aufgabe 1

### 5.2 Aufgabe 2

### 5.3 Aufgabe 3

Abbildung 12: Emulierte Netzwerk: Aktivität der Synfire-Kette einschließlich des Membranpotenzials des Neurons mit ID=0



## 6 Rekurrente Netzwerke

### 6.1 Aufgabe 1

### 6.2 Aufgabe 2

### 6.3 Aufgabe 3

## 7 Eine einfache Berechnung - XOR

7.1 Aufgabe 1

7.2 Aufgabe 2

7.3 Aufgabe 3

7.4 Aufgabe 4