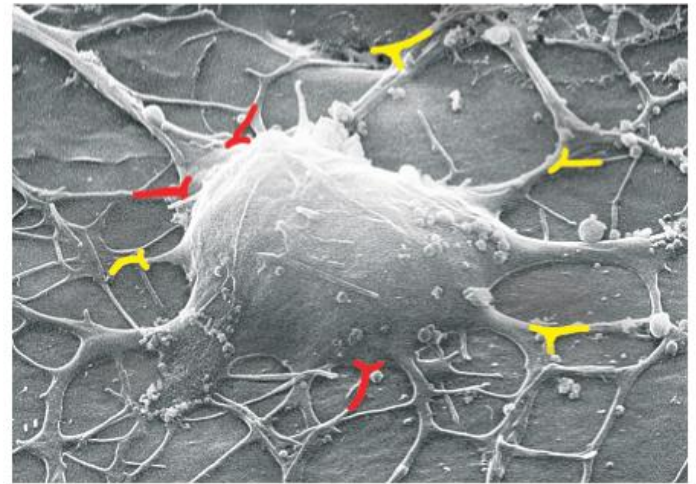


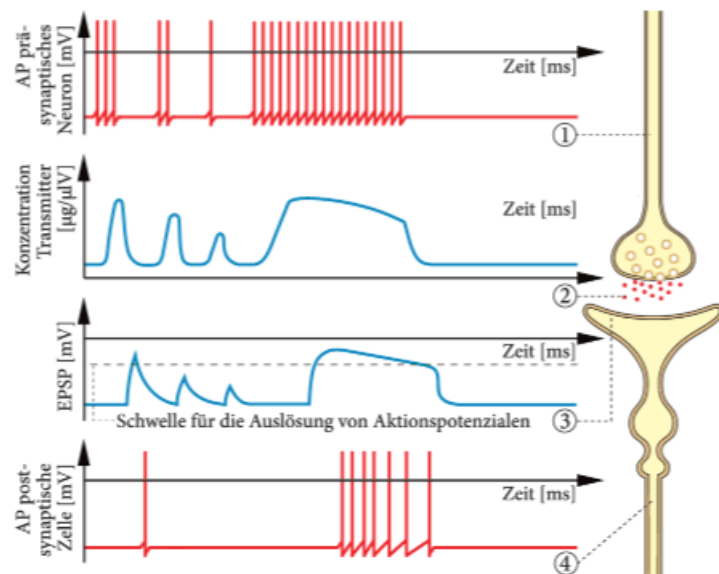
Verrechnung an Synapsen

Neuronen im Gehirn haben oft bis zu mehrere Tausend erregende und hemmende Synapsen (Abb. 36.1): In diesen Neuronen **laufen Informationen von vielen anderen Neuronen zusammen**. Dieses **Verschaltungsprinzip heißt Konvergenz** (lat. *convergere*, sich hinneigen). Erregende und hemmende Synapsen erzeugen dabei exzitatorische (EPSP, → S. 33) oder inhibitorische postsynaptische Potenziale (IPSP, → S. 34). Am weiterleitenden Axon des postsynaptischen Neurons werden aus diesen PSP neue Aktionspotenziale gebildet oder auch nicht.



36.1 Neuron mit Synapsen (rot hemmend, gelb erregend)

Aktionspotenziale (AP) sind digitale Signale, weil sie nach dem Alles-oder-Nichts-Prinzip gebildet werden. Besonders intensive Erregungen können also nicht über die Intensität der AP codiert werden. Sie werden nur über die Frequenz, den zeitlichen Abstand der untereinander identischen AP dargestellt. Die **Intensität wird also digital über die Frequenzmodulation** (lat. *modulatio*, Takt) der AP abgebildet (①, Abb. 36.2). An der **präsynaptischen Membran entsteht daraus eine variable, analoge Konzentration an Calciumionen (Ca^{2+})** (→ S. 32). Das heißt, je mehr AP eintreffen, desto größer ist die Menge an Ca^{2+} . Das Ca^{2+} initiiert dann die Freisetzung einer analogen Menge an Neurotransmitter-Molekülen ②. Also ist die **präsynaptische Zelle ein Digital-Analog-Wandler**.

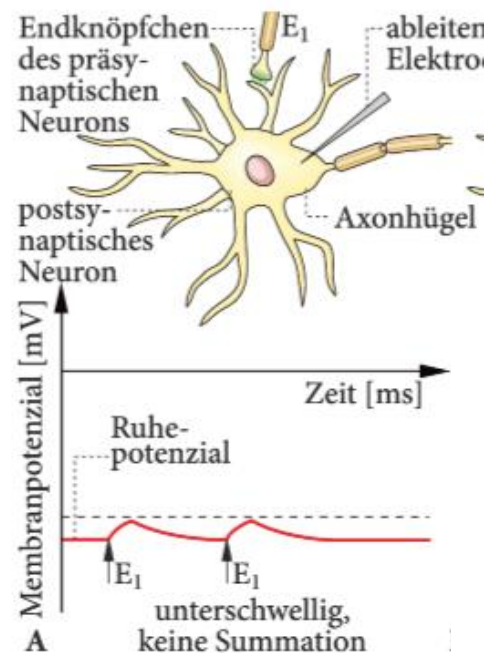


36.2 Signalverarbeitung an chemischer Synapse

Die Konzentration an Neurotransmitter bestimmt die Öffnungsdauer der postsynaptischen Ionen-Kanäle. Im Falle einer erregenden Synapse entsteht dort ein in Intensität und Dauer entsprechend hohes EPSP ③. Dieses depolarisiert die postsynaptische Membran deutlich weniger als ein AP.

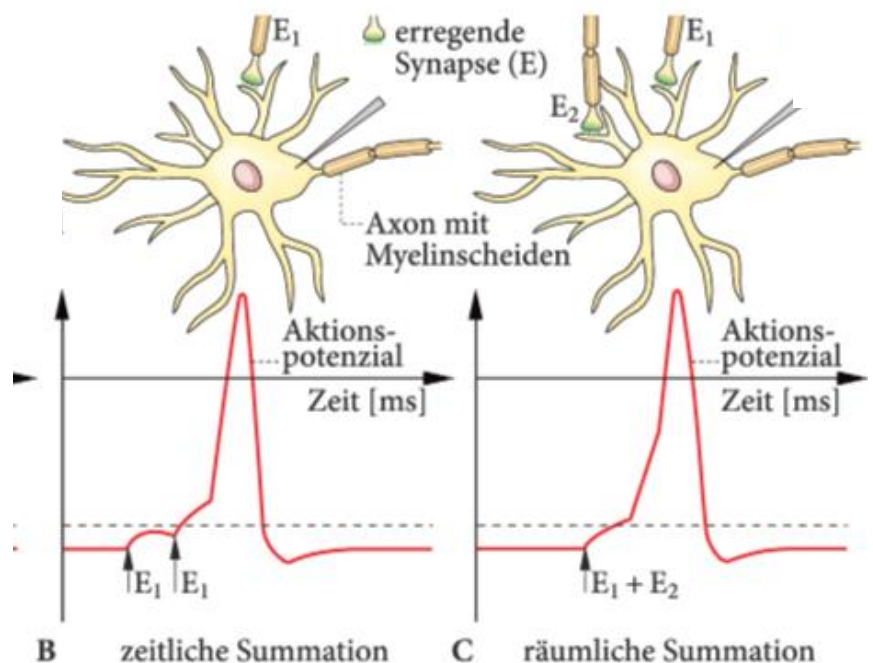
In der postsynaptischen Membran gibt es keine spannungsabhängigen Natriumionen-Kanäle. Deshalb wird das EPSP passiv an der Membran entlang weitergeleitet und schwächt sich mit zunehmender Entfernung vom Entstehungsort immer mehr ab. Wegen dieser Leitungsverluste sind näher am Axonhügel gelegene Synapsen wirksamer als weiter entfernte. Entscheidend ist letztlich, was von diesen EPSP am Axonhügel noch übrig ist. Der Schwellenwert der Membran zur Auslösung von AP ist am Axonhügel um etwa 20 mV niedriger als sonst am Axon, denn dort befinden sich überdurchschnittlich viele spannungsabhängige Natriumionen-Kanäle. Depolarisiert das EPSP die Membran am Axonhügel über den Schwellenwert hinaus, öffnen sich diese Kanäle und AP werden gebildet ④. Der **Axonhügel des postsynaptischen Neurons ist demnach ein Analog-Digital-Wandler**, der die analogen EPSP wieder in eine digitale Frequenz von AP überträgt.

Ein EPSP kann durch die passive Weiterleitung am Axonhügel so abgeschwächt sein, dass es unterschwellig ist. Dann werden keine AP gebildet (Abb. 37.1 A).



Treffen jedoch zwei unterschwellige EPSP zeitlich kurz hintereinander am Axonhügel ein, können sie sich zu einem überschwelligen EPSP addieren und die Bildung von AP auslösen. Dieses Phänomen heißt **zeitliche Summation** (Abb.B).

Ein ähnliches Phänomen tritt auf, wenn zwei oder mehr verschiedene Synapsen zur gleichen Zeit ein am Axonhügel für sich jeweils unterschwelliges EPSP produzieren. Auch diese EPSP summieren sich zu einem überschwelligen EPSP und es werden in einer **räumlichen Summation** Aktionspotentiale generiert (Abb. C).

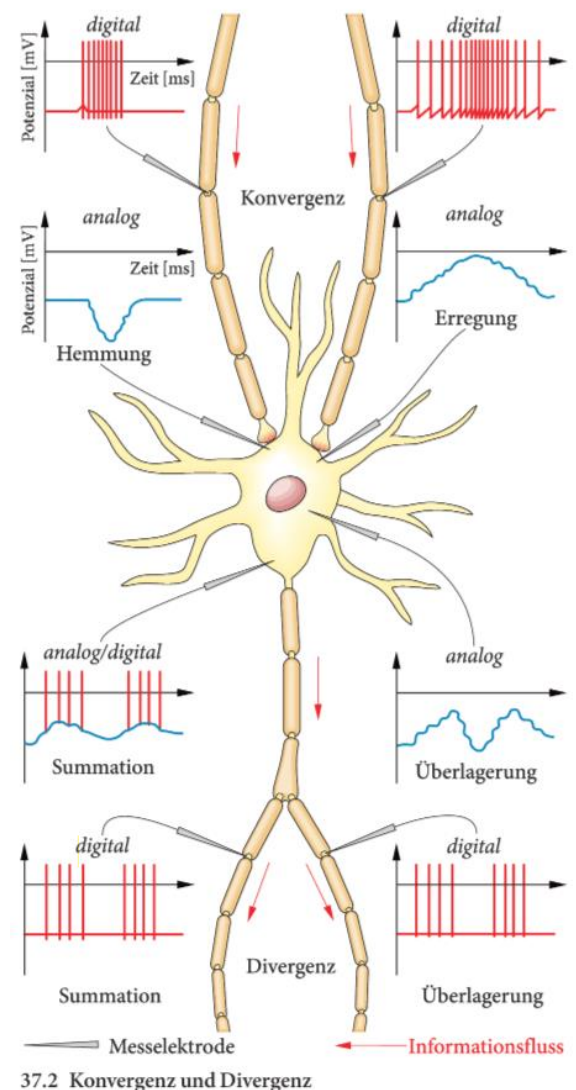


Genauso werden auch IPSP in räumlicher Summation integriert: Treten gleichzeitig IPSP und EPSP auf, überlagern sich die Effekte von Depolarisation und Hyperpolarisation an der postsynaptischen Membran. Die Signale werden gegeneinander verrechnet. Ist das Ergebnis dieser Verrechnung am Axonhügel überschwellig, werden AP generiert. Ist es unterschwellig, unterbleibt deren Bildung

Die beiden Summationsphänomene sind von entscheidender Bedeutung bei der Verarbeitung neuronaler Signale.

Das Axon des postsynaptischen Neurons teilt sich häufig in Kollateralen auf (→ S. 9). Die AP werden so durch **Divergenz** (lat. *divergere*, auseinander weichen) auf viele weitere Neuronen verteilt. Die AP werden bei der Weiterleitung ständig neu gebildet, deshalb unterscheiden sich die Erregungsmuster divergenter Kollateralen voneinander nicht. Konvergenz und Divergenz sind wichtige Funktionsprinzipien der Informationsverarbeitung im Nervensystem.

Die Verrechnung verschiedener Synapseneinwirkungen an einem Neuron sind beispielhaft in Abb. 37.2 dargestellt. Dabei ist sowohl die Umwandlung digitaler Aktionspotenziale in analoge postsynaptische Potenziale berücksichtigt als auch verschiedene Summationseffekte.



37.2 Konvergenz und Divergenz

AUFGABEN:

- 1 Beschreiben Sie das Zustandekommen von räumlicher und zeitlicher Summation.
- 2 Erläutern Sie die Veränderungen der Potenziale an den verschiedenen Messpunkten am Axon in Abb. 37.2.