

# Wie wird Lichtenergie in elektrische Erregung eines Fotorezeptors umgesetzt?

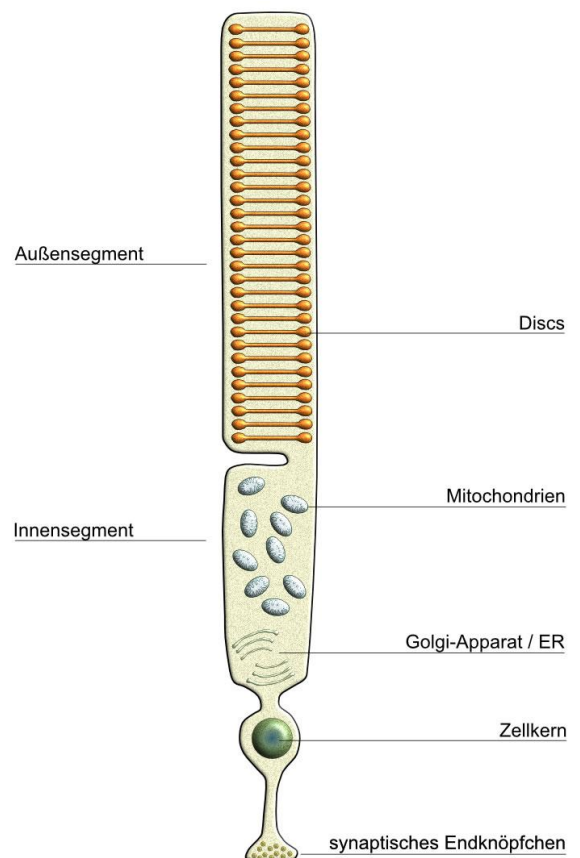
Im Stockdunkeln gibt es keinen visuellen Reiz. Erwartungsgemäß sollte daher in den Fotorezeptorzellen ein Ruhepotential von  $-70\text{ mV}$  gemessen werden (so wie es für Neuronen typisch ist). In den Fotorezeptoren jedoch wird bei Dunkelheit – also im Ruhezustand – ein Membranpotential von  $-40\text{ mV}$  gemessen. Wie ist das zu erklären?

## INFO: Aufbau der Fotorezeptoren am Beispiel der Stäbchen

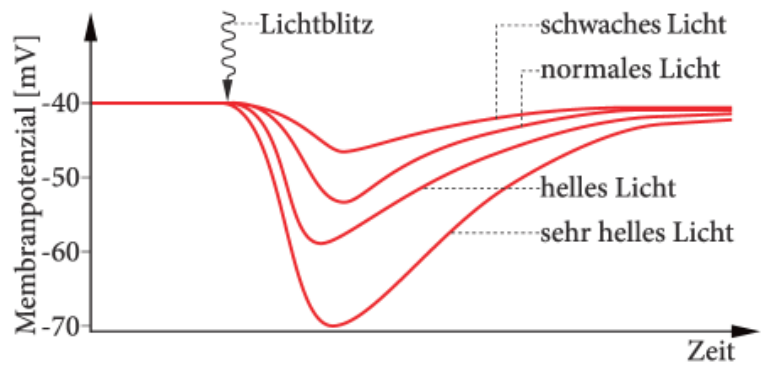
Die menschliche Netzhaut besitzt ca. 120 Millionen Stäbchen (siehe Abb.) und 6 Millionen Zapfen. Beide Rezeptortypen sind im Prinzip ähnlich aufgebaut. Sie bestehen aus einem Außenglied, das durch ein dünnes Verbindungsstück (das Cilium) mit einem Innenglied verbunden ist. Das Außenglied enthält ca. 1.000 Membranscheiben (Discs). In die Membranscheiben eingelagert befindet sich der Sehfärbstoff Rhodopsin (Sehpurpur). Die stapelartig angeordneten Discs verfügen über eine große Membranoberfläche (Prinzip der Oberflächenvergrößerung) und können daher zahlreiche Rhodopsinmoleküle einbauen.

Das Innenglied enthält einen großen Zellkern, viele Mitochondrien und ein umfangreich ausgeprägtes Endoplasmatisches Reticulum (ER). Die Organellen ermöglichen eine hohe Stoffwechselaktivität, die u.a. für die Synthese des Rhodopsins benötigt wird.

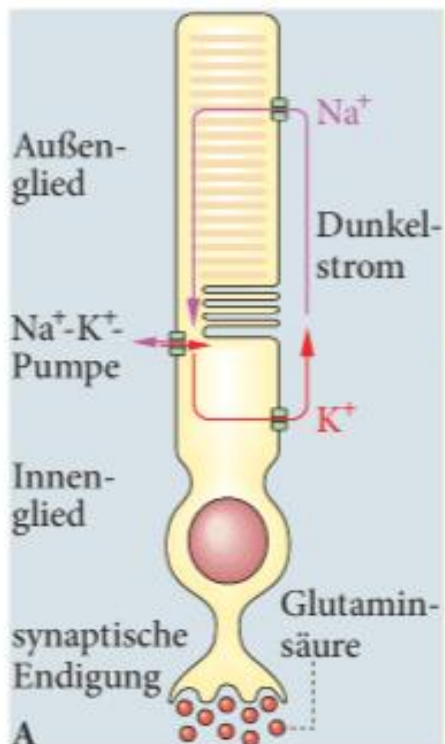
Die Fortsätze der Stäbchen treten über Synapsen mit nachgeordneten Nervenzellen in Kontakt. Dabei bilden die synaptischen Endigungen der Stäbchen Einstülpungen, welche die Fortsätze der Bipolarzellen aufnehmen.



Wie bereits gesagt, wird bei Dunkelheit an den Stäbchen ein Membranpotential von  $-40\text{ mV}$  gemessen. Das bedeutet, dass die unerregten Fotorezeptoren leicht depolarisiert sind. Bei Belichtung sinkt das Membranpotential und erreicht bei starken Lichtreizen  $-70\text{ mV}$  (Abbildung rechts).



72.1 Rezeptorpotenziale der Stäbchen bei unterschiedlich starken Lichtreizen



Im Dunkeln sind spezifische Natrium-Kanäle geöffnet, über die  $\text{Na}^+$ -Ionen entsprechend dem Konzentrationsgefälle in das Außenglied der Stäbchen eindiffundieren können. Dadurch depolarisiert die Zelle, wodurch das Membranpotential geringer wird. Kaliumionen ( $\text{K}^+$ ) diffundieren verstärkt über  $\text{K}^+$ -Kanäle in der Membran des Innengliedes aus dem Stäbchen nach außen. Natrium-Kalium-Ionenpumpen verhindern einen Konzentrationsausgleich: Entgegen dem Konzentrationsgefälle werden unter Verbrauch von ATP drei  $\text{Na}^+$  aus dem Zytoplasma und zwei  $\text{K}^+$  in das Zytoplasma des Stäbchens transportiert. Es stellt sich somit ein konstanter Ionenstrom ein, der als **Dunkelstrom** bezeichnet wird.

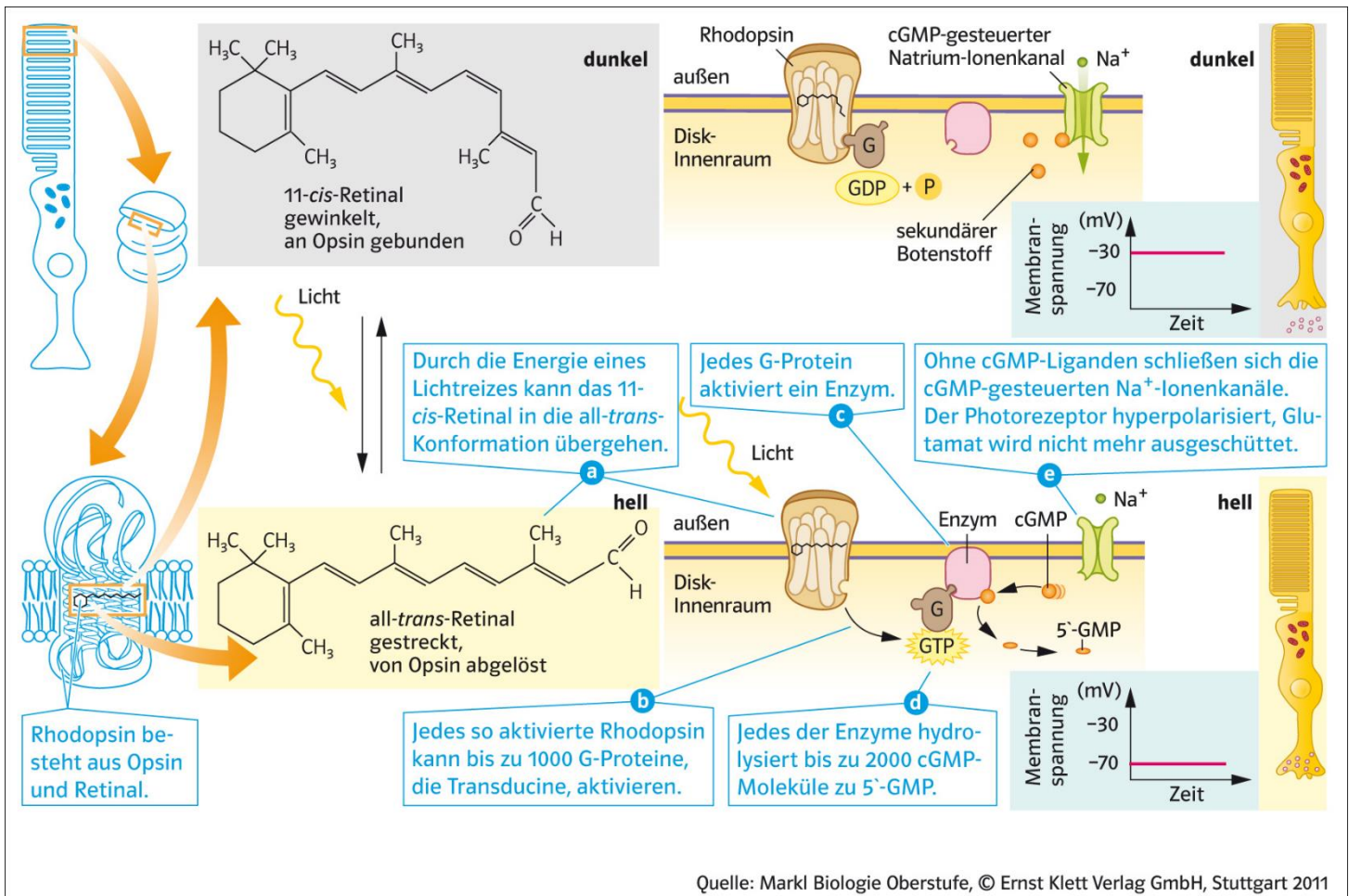
Die Folge des Dunkelstroms ist, dass die Fotorezeptoren im Dunkeln ständig den Neurotransmitter Glutamat (Glutaminsäure) ausschütten.

Wird nur ein Lichtquant von einem Fotopigment (das Fotopigment der Stäbchen ist Rhodopsin) absorbiert (aufgenommen), beginnt die **FOTOTRANSDUKTION**.

## Die Fototransduktion - Lichtreize werden in chemische Signale überführt

Fotorezeptoren enthalten große Mengen an Rhodopsinmolekülen, die in den Membranscheiben (den Disks), eingebaut sind. Hier findet die eigentliche Umwandlung des Lichtreizes in ein zelluläres Signal, die Fototransduktion, statt.

Jedes Rhodopsin besteht aus einem **Opsin** (einem Protein, das selbst nicht lichtempfindlich ist) und dem lichtabsorbierenden **Retinal**. Das Retinal kann einzelne Lichtteilchen (Photonen) „einfangen“ (absorbieren) und dann mithilfe der aufgenommenen Energie eine Konformationsänderung durchführen. Durch die Aufnahme des Photons geht das Retinal von der gewinkelten **11-cis-Form** in die gestreckte **all-trans-Form** über (siehe Abb. unten). In seiner gestreckten Form löst es sich vom Opsin, das **Rhodopsin zerfällt**.



Die nun folgenden Teilreaktionen sind noch nicht bis in alle Einzelheiten aufgeklärt. Als gesichert gilt, dass das Retinal in seiner gestreckten Form eine Kettenreaktion (Signalkette) auslöst. Jedes aktivierte Rhodopsin aktiviert bis zu 1000 **G-Proteine (Transducin-Moleküle)**, die mit je 1000 Enzymmolekülen (Phosphodiesterasen = PDE) gekoppelt sind. Das Enzym **Phosphodiesterase wandelt cGMP um zu 5'-GMP**, wobei jedes Enzymmolekül innerhalb kurzer Zeit rund 2000 cGMP-Moleküle umsetzt. Durch den beschriebenen Prozess der Kettenreaktion resultiert ein Verstärkungseffekt von 1:1 Million.

Im Gegensatz zu cGMP, der im Dunkeln die **Na<sup>+</sup>-Kanäle offenhält**, kann **5'-GMP nicht die Natrium-Kanäle** der Stäbchen-Zellmembran **öffnen**. Der **fallende cGMP-Spiegel** in der Fotorezeptorzelle bewirkt, dass die **Natrium-Kanäle geschlossen** werden und keine Na<sup>+</sup>-Ionen mehr in die Stäbchen hineinfließen können. Die **Membran des Stäbchens hyperpolarisiert** (das Membranpotential nimmt ab, es wird negativer); der Neurotransmitter **Glutamat wird nicht**

mehr ausgeschüttet. Mithilfe der Signalkette kann ein einzelnes Photon das Schließen von tausenden Natriumkanälen bewirken.

Um das Retinal wieder in die gewinkelte Ausgangsform überführen zu können, wird es vollständig vom Opsin abgekoppelt. In seiner gewinkelten Form passt es sich erneut in die Bindungszentren des Opsins ein. Der Neuzusammenbau (die Regeneration) des Rhodopsins erfolgt unter ATP-Verbrauch.

## Zusammenfassung

**Zusammenfassend kann man also sagen, dass der Einfall von Licht eine Neurotransmitter-Ausschüttung des Fotorezeptors verhindert bzw. hemmt.**

Ein Fotorezeptor, sei es ein Stäbchen oder ein Zapfen, schüttet im Dunklen ständig Neurotransmitter aus. Bei Belichtung (mit der richtigen Wellenlänge) wird dieser Prozess gehemmt bzw. stillgelegt.

### Wieso "sehen" wir etwas, wenn Licht den Dunkelstrom hemmt?

Die Synapsen der Fotorezeptoren kann man als **hemmende** Synapsen betrachten. Solange der Dunkelstrom fließt, schütten diese Synapsen den Neurotransmitter Glutamat aus - dieser Neurotransmitter hemmt die nachfolgende Zelle, so dass diese keine Aktionspotenziale über den Sehnerv zum Gehirn schicken kann.

**Wird der Fotorezeptor dagegen belichtet, wird dieser Dunkelstrom gehemmt, und es werden keine hemmenden Neurotransmitter mehr an die nachfolgenden Zellen ausgeschüttet.** Da diese nicht mehr gehemmt werden, senden sie nun Aktionspotenziale über den Sehnerv an das Sehzentrum des Gehirns, und wir "sehen" etwas.

Eine gute Erklärung der Prozesse der Fototransduktion finden Sie im folgenden Video:

[www.youtube.com/watch?v=8\\_FQE1eDcgM&t=3s](https://www.youtube.com/watch?v=8_FQE1eDcgM&t=3s)