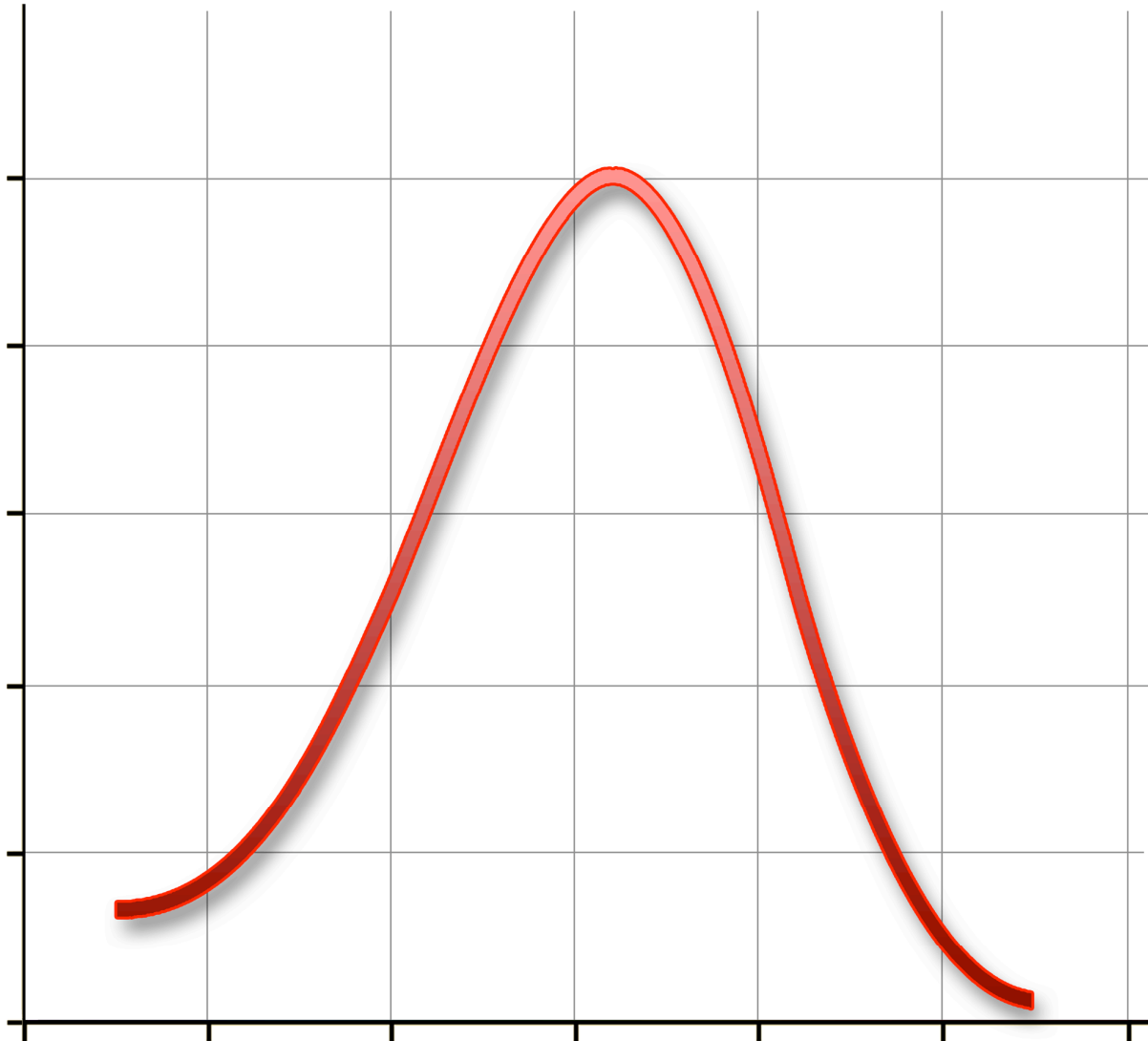
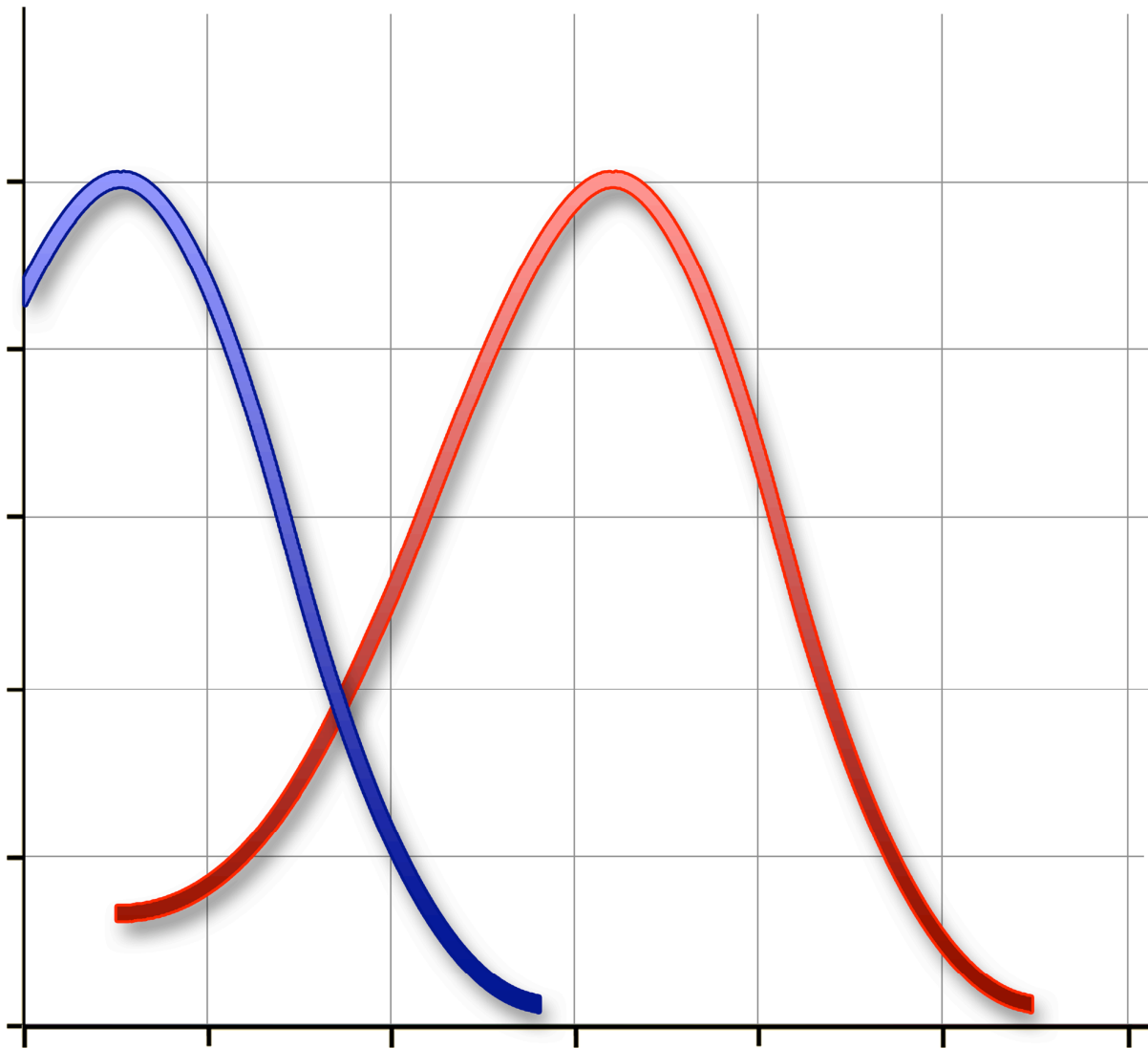


Grundlagen des Farbensehens



Arbeitsaufträge:

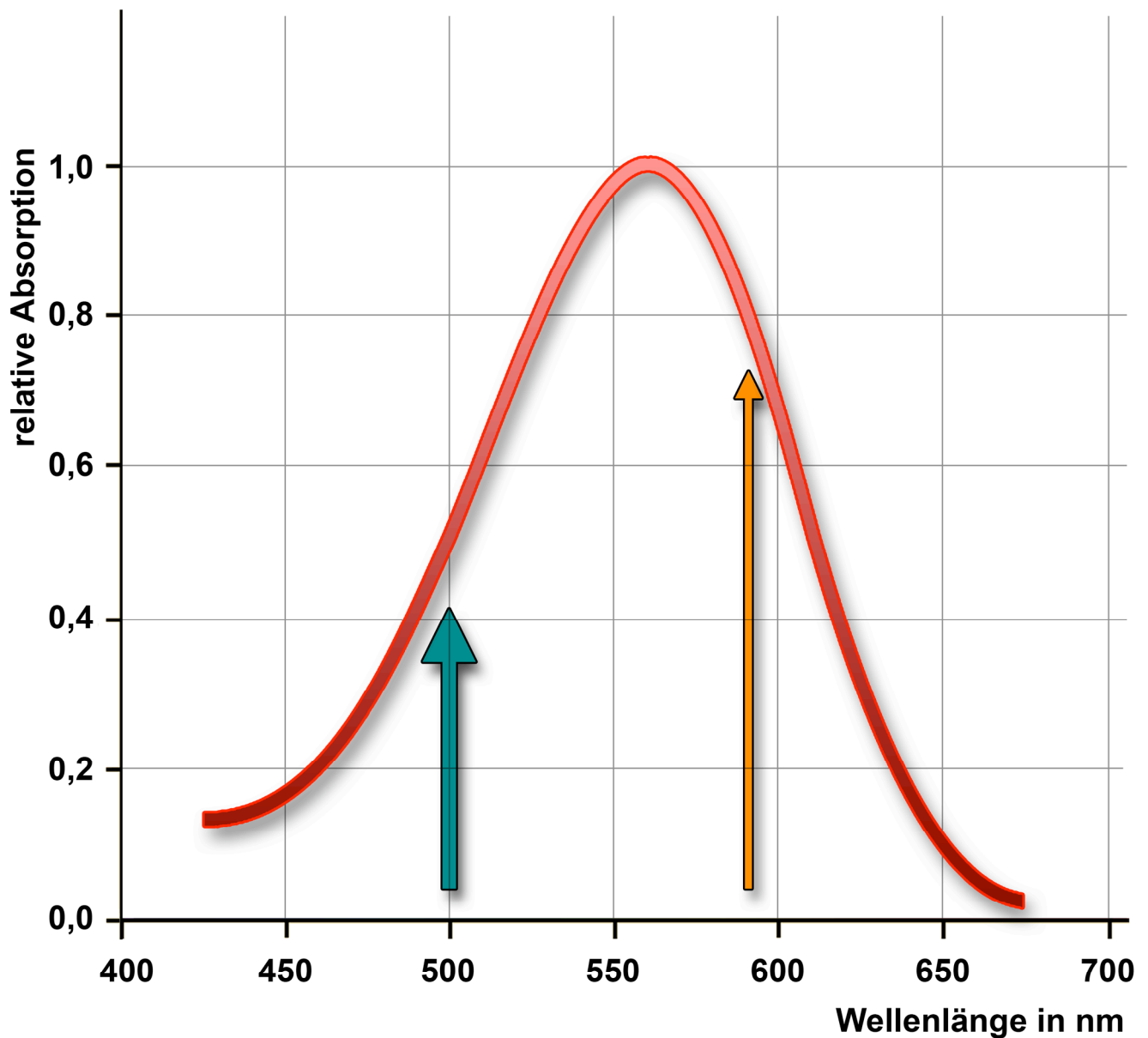
1. Beschriften Sie die Koordinatenachsen des Diagramms und schreiben Sie an das Absorptionsmaximum die Farbe und die Wellenlänge des absorbierten Lichts.
2. Wie würden Sie experimentell vorgehen, um die dargestellten Daten zu gewinnen?
3. Kennzeichnen Sie durch zwei vertikale Linien zwei verschiedene Farben des Spektrums, die zu gleichen Anteilen absorbiert werden.
4. Formulieren Sie das Problem, das durch diese beiden Linien angedeutet wird.



Arbeitsaufträge

1. Beschriften Sie die Koordinatenachsen des Diagramms und schreiben Sie an die Absorptionsmaxima die Farben und die Wellenlängen des jeweils absorbierten Lichts.
2. Inwieweit wird durch den zweiten Zapfentyp das von Ihnen auf Seite 1 formulierte Problem gelöst?
3. Zeichnen Sie die entsprechende Kurve für den "Grünzapfen" in das Diagramm ein.
4. Erläutern Sie am Beispiel von Licht der Wellenlängen 540 und 580 nm, welche Vorteile beim Unterscheiden von Farben dieser dritte Zapfentyp bietet.
5. Überprüfen Sie mithilfe der Abbildung im Artikel, ob die Bezeichnungen "Blauzapfen", "Grünzapfen" und "Rotzapfen" gerechtfertigt sind.

Lichtabsorption durch die Zapfen



Absorption von Licht verschiedener Wellenlängen durch einen "Rotzapfen". Das 500 nm-Licht ist doppelt so intensiv wie das 590 nm-Licht.

Arbeitsauftrag:

Die Abbildung veranschaulicht ein Problem, das auf Seite 98 des Artikels angesprochen wird. Erläutern Sie dieses Problem mithilfe der Abbildung.

Genetik des Rot-Grün-Sehens

Die Blau-, Grün- und Rotzapfen des Auges enthalten als Sehfärbstoff ein Protein mit dem Namen *Opsin*, das an ein lichtempfindliches Molekül namens *Retinal* gekoppelt ist. Wird das Retinal durch Absorption von Licht aktiviert, so ändert sich die Struktur der Opsin-Komponente, was eine ganze Kaskade biochemischer Reaktionen auslöst, die schließlich zum Seheindruck im Gehirn führen. Die Sehfärbstoffe der verschiedenen Zapfentypen unterscheiden sich in ihren Opsin-Komponenten; es gibt also ein Blau-Opsin, ein Grün-Opsin und ein Rot-Opsin. Das Gen für das Blau-Opsin liegt auf Chromosom 7, die Gene für das Rot- und das Grün-Opsin dagegen auf dem X-Chromosom. Das Y-Chromosom enthält kein Opsin-Gen.

Männer besitzen in jeder Körperzelle somit zwei Allele für das Blau-Opsin, aber nur jeweils ein Allel für das Rot- und das Grün-Opsin. Ist das Rot- oder das Grün-Allel defekt, so enthält die Netzhaut dieses Mannes keine Rot- bzw. Grün-Zapfen, der Mann kann die Farben Rot und Grün nicht unterscheiden und ist rot-grün-blind. Ist dagegen eines der beiden Blau-Allele defekt, so können Blau-Zapfen gebildet werden. Nur wenn der Defekt homozygot vorliegt, wenn also beide Blau-Allele zu einem fehlerhaften Blau-Opsin führen, ist der Mann blaublind.

Frauen haben in jeder Körperzelle zwei X-Chromosomen, man sollte daher denken, dass die Rot- und Grünzapfen einer Frau doppelt soviel Rot- bzw. Grün-Opsin enthalten wie die eines Mannes, und dass ein Ausfall eines Rot- bzw. Grün-Allels nicht so gravierend ist. Ganz so einfach stellt sich die Sachlage aller-

dings nicht dar. Bei Frauen wird in jeder Körperzelle eines der beiden X-Chromosomen deaktiviert, und aus dem deaktivierten X-Chromosom bildet sich das so genannte Barr-Körperchen. Welches der beiden X-Chromosomen deaktiviert wird, das väterliche oder das mütterliche, wird in jeder Zelle durch den Zufall entschieden. Hat eine Frau also ein defektes Rot-Allel, sind zirka 50% der Rot-Zapfen in der Netzhaut funktionsunfähig, 50% funktionieren dagegen normal. Gleiches gilt für die Grün-Zapfen, wenn eines der beiden Grün-Allele defekt ist. Aus diesem Grund leiden nur 0,8% aller Frauen unter einer Rot-Grün-Blindheit. Es müssen nämlich beide X-Chromosomen betroffen sein, damit eine Frau gar keine funktionsfähigen Rot- oder Grün-Zapfen ausbilden kann. Bei Männern kommt die Rot-Grün-Blindheit wesentlich häufiger vor, da sie ja nur ein einziges Rot- bzw. Grün-Allel besitzen.

Vier-Farben-Sehen bei Frauen ist ein Phänomen, das folgendermaßen zu Stande kommt: Das Rot-Allel auf dem einen X-Chromosom ist völlig intakt, so dass das gebildete Rot-Opsin sein Absorptionsmaximum bei 560 nm hat. Das Rot-Allel auf dem anderen X-Chromosom ist dagegen leicht verändert, und das gebildete Rot-Opsin hat sein Absorptionsmaximum beispielsweise bei 620 nm. Die Hälfte der Rot-Zapfen einer solchen Frau absorbiert nun bei 560 nm, und die andere Hälfte bei 620 nm. Diese Frau hat also vier verschiedene Zapfentypen und kann daher tetrachromatisch sehen. Zwei verschiedene Grün-Allele würden zu dem gleichen Effekt führen.

Arbeitsaufträge:

1. Berechnen Sie aus den Angaben im Text, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Mann rot-grün-blind ist.
2. Begründen Sie, wieso ein tetrachromatisches Sehen beim Mann nicht möglich ist.
3. Vervollständigen Sie die Tabelle auf der nächsten Seite. Ergänzen Sie die Farben der Allele und die Beschreibungen!

		<p>Rot-grün-blinder Mann: Grünzapfen fehlen</p>	
<p>Rot-grün-blinder Mann: Rotzapfen fehlen</p>	<p>Gesunde Frau mit ca. 50% der Grünzapfen</p>	<p>Rot-grün-blinde Frau: Grünzapfen fehlen</p>	<p>Rot-grün-blinde Frau: Rotzapfen fehlen</p>
		<p><i>Anmerkung:</i> Bei den Zeichnungen wurde die X-Chromosomen-Inaktivierung nicht berücksichtigt. In jeder Körperzelle einer Frau ist nur eines der beiden X-Chromosomen aktiv.</p>	

Lösungen zu Arbeitsblatt 1-1

Arbeitsaufträge Seite 1

1. Beschriftung

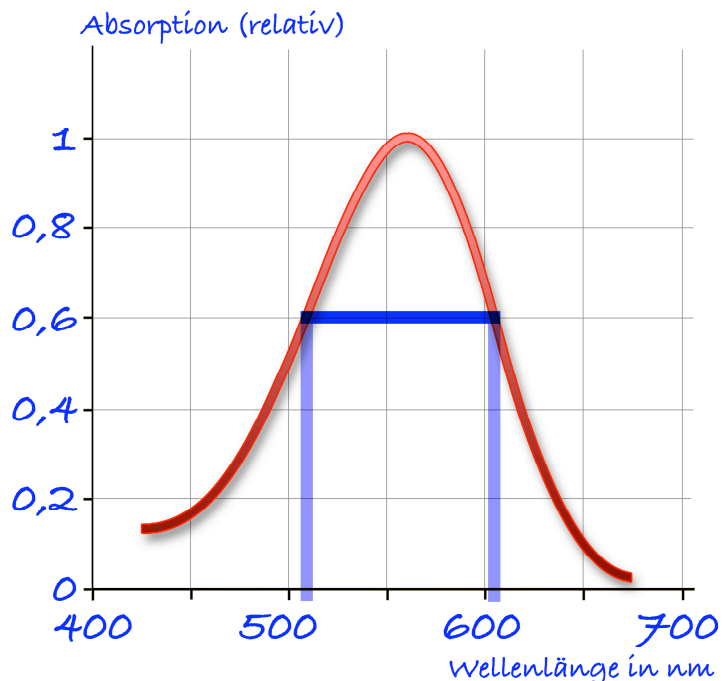
siehe Abbildung rechts

2. Experimentelles Vorgehen, um die Daten zu gewinnen

Man könnte erstens versuchen, das lichtempfindliche Farbpigment aus den Zapfen zu isolieren und dann mit einem Absorptionsspektrometer zu untersuchen. Auf ähnliche Art und Weise hat man ja auch die Wirkung des Blattfarbstoffs Chlorophyll untersucht.

Man könnte auch versuchen, das Membranpotenzial eines Rotzapfens abzuleiten, während man den Rezeptor mit Licht verschiedener Wellenlänge aber der selben Intensität bestrahlt.

Wenn man beide Methoden kombiniert, würde man wahrscheinlich die besten Ergebnisse erzielen.



3. Zwei Farben des Spektrums, die zu gleichen Anteilen absorbiert werden.

siehe Abbildung rechts

4. Problem formulieren

Zwei völlig unterschiedliche Farben (blaugrün und orange) werden mit dem gleichen Prozentsatz (60%) absorbiert; der Rotzapfen würde also bei beiden Farben die gleiche Information weiterleiten, die Netzhaut bzw. das Sehzentrum im Gehirn könnte nicht zwischen "blaugrün" und "orange" unterscheiden.

Arbeitsaufträge Seite 2

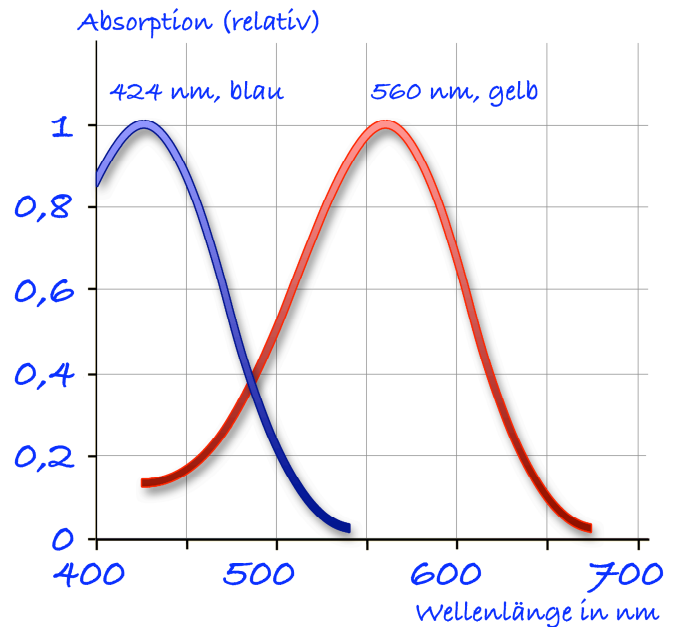
1. Beschriftung

Siehe Abbildung rechts

2. Problemlösung durch zweiten Zapfentyp

Zum Teil wird das Problem gelöst. Licht der Wellenlängen 510 nm (blaugrün) und 600 nm (orange) kann von der Netzhaut oder dem Sehzentrum unterschieden werden, wenn sowohl die Informationen der Rotzapfen wie auch die der Blauzapfen berücksichtigt werden. Dies soll an einem Beispiel verdeutlicht werden:

- Licht der Wellenlänge 510 nm erregt den Rotzapfen zu 60% und den Blauzapfen zu 15%.
- Licht der Wellenlänge 600 nm erregt den Rotzapfen ebenfalls zu 60%, den Blauzapfen aber gar nicht (0%).



3. Kurve für Grünzapfen einzeichnen

Siehe Abbildung in Spektrum der Wissenschaft, Seite ...

4. Vorteile des dritten Zapfentyps

Es gibt Wellenlängen, die nicht durch die beiden Zapfentypen "Rot" und "Blau" nicht eindeutig unterschieden werden können:

- Licht der Wellenlänge 540 nm erregt den Rotzapfen zu ca. 85% und den Blauzapfen zu 0%.
- Licht der Wellenlänge 580 nm erregt den Rotzapfen ebenfalls zu 85% und den Blauzapfen zu 0%.

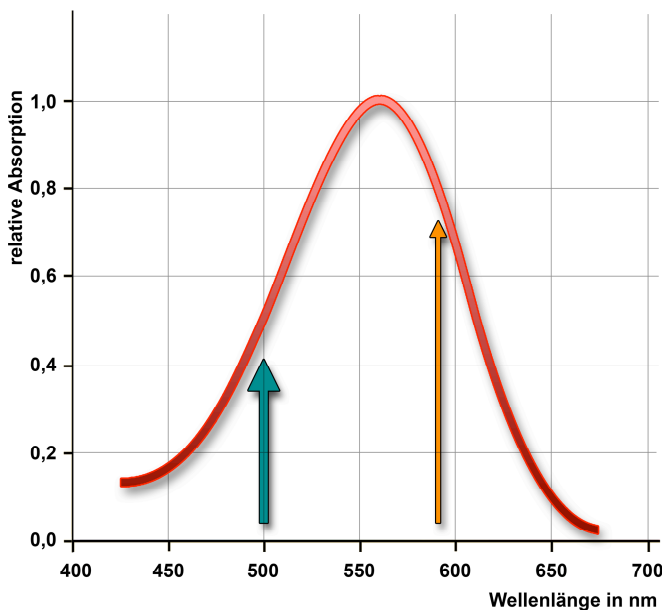
Ein dritter Zapfentyp mit einem Absorptionsmaxima zwischen 424 nm und 560 nm könnte hier Abhilfe schaffen.

- Licht der Wellenlänge 540 nm erregt die drei Zapfentypen wie folgt: Rot 85%, Blau 0%, Grün 90%.
- Licht der Wellenlänge 580 nm erregt die drei Zapfentypen wie folgt: Rot 85%, Blau 0%, Grün 50%.

5. Bezeichnung der Zapfentypen

Die Bezeichnungen der Zapfentypen sind nicht immer zutreffend. Der "Blauzapfen" hat sein Absorptionsmaximum im blau-violetten Bereich, der "Grünzapfen" im grünen Bereich und der "Rotzapfen" im gelben Bereich des Spektrums. Eigentlich trägt also nur der "Grünzapfen" seinen Namen zu Recht.

Lösung zu Arbeitsblatt 1-2



Ein Photorezeptor wird erregt, wenn seine Photopigmente Lichtquanten absorbieren. Bereits wenige absorbierte Lichtquanten (teils reicht schon ein einziges Lichtquant aus) führen zu einer Strukturänderung des absorbierenden Pigments Retinal, was eine ganze Reaktionskaskade auslöst, die schließlich zur Erregung des Photorezeptors führt.

Je höher die Intensität des absorbierten Lichts, desto mehr Retinal-Moleküle werden aktiviert, und desto stärker ist die Erregung des Rezeptors.

Der Rotrezeptor kann Licht der Wellenlänge 590 nm besser absorbieren als Licht der Wellenlänge 500 nm. Das heißt, 590 nm-Licht aktiviert mehr Retinal-Moleküle als 500 nm-Licht gleicher Intensität. 500 nm-Licht höherer Intensität (dickerer Pfeil in der Abbildung) kann aber genau so viele Retinal-Moleküle aktivieren wie 590 nm-Licht geringerer Intensität.

Dies führt zu dem Problem, dass ein Zapfentyp nicht nur durch Licht zweier verschiedener Wellenlängen und gleicher Intensität (wie z.B. 500 nm und 640 nm) gleich stark erregt wird (also nicht zwischen den beiden Wellenlängen unterscheiden kann), sondern dass dieser Zapfentyp sogar durch Licht vieler verschiedener Wellenlängen gleich stark erregt werden kann, in Abhängigkeit von der Lichtintensität.

Kommentar

Die Schüler(innen) müssen den entsprechenden Abschnitt des Artikels sehr sorgfältig lesen, wenn sie diese nicht ganz einfachen Zusammenhänge wirklich verstehen wollen. Die Lehrperson sollte an dieser Stelle vielleicht einen entsprechenden Hinweis geben ("...lest euch diesen Abschnitt besonders genau durch!").

Lösung zu Arbeitsblatt 1-3

Arbeitsauftrag 1:

Im Text wurde erwähnt, dass zirka 0,8% der Frauen unter der Rot-Grün-Blindheit leiden. Damit eine Frau rot-grün-blind ist, müssen beide X-Chromosomen ein defektes Rot- oder Grün-Allel besitzen.

Nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung gilt

$$W_{AB} = W_A * W_B$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Ereignisse A, B gleichzeitig eintreffen, ist das Produkt der Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Ereignisse. So ist zum Beispiel die Wahrscheinlichkeit, mit zwei Würfeln gleichzeitig eine Sechs zu würfeln genau $\frac{1}{6} * \frac{1}{6}$.

Die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Frau beide X-Chromosomen ein defektes Rot- oder Grün-Allel tragen, beträgt 0,8% oder anders ausgedrückt $W_{XX} = 0,008$. Zieht man aus dieser Zahl die Quadratwurzel, erhält man die Wahrscheinlichkeit W_X für eine defektes Rot- oder Grün-Allel auf *einem* X-Chromosom.

$$W_X = \sqrt{W_{XX}} = 0,089$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Mann rot-grün-blind ist, liegt also bei rund 9%.

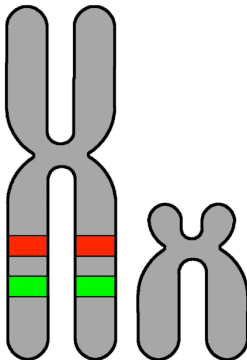
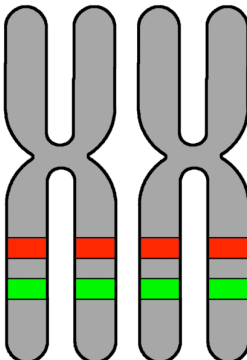
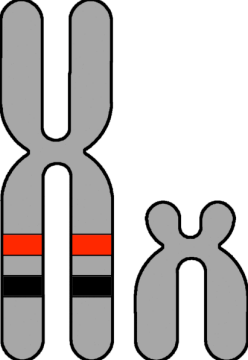
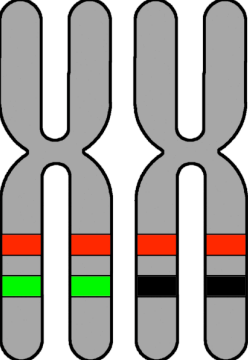
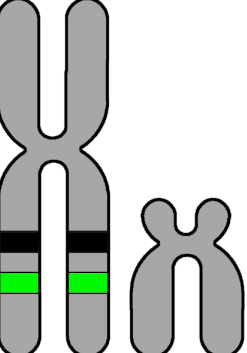
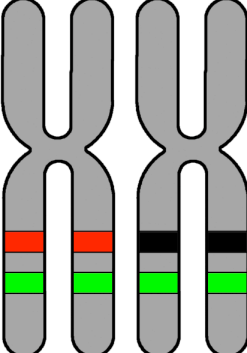
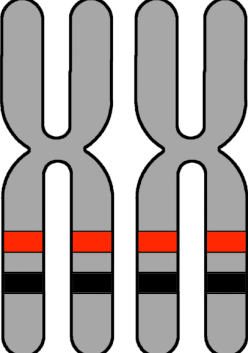
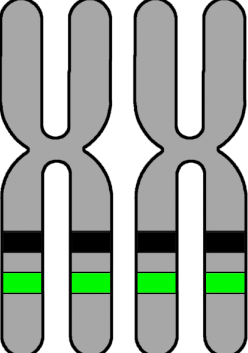
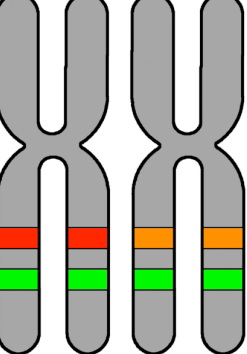
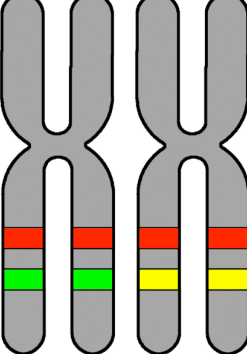
Arbeitsauftrag 2:

Männer haben nur ein Allel für Rot- bzw. Grün-Opsine. Ist dieses Allel verändert, so ist das entsprechende Opsin entweder funktionsunfähig und der Mann ist rot-grün-blind, oder das Opsin hat ein verändertes Absorptionsmaximum. In diesem Fall wird das veränderte funktionsfähige Opsin in allen Rot- bzw. Grün-Zapfen ausgebildet, so dass der Mann nur *eine* Sorte von Rot- oder Grün-Zapfen besitzt. Da er außerdem Blau-Zapfen in seiner Netzhaut hat, kann er ganz normal trichromatisch sehen.

Nun könnte es sein, dass eines der beiden Blau-Allele verändert ist, so dass das entsprechende Blau-Opsin funktionsfähig ist, aber ein verändertes Absorptionsmaximum hat. In diesem Fall würde jeder Blau-Zapfen zwei verschiedene Sorten von Blau-Opsinen besitzen, da ja in jedem Blau-Zapfen beide Allele exprimiert werden. Der Mann hätte aber weiterhin nur *eine* Sorte von Blau-Zapfen, insgesamt also drei verschiedene Zapfen-Typen, was zum trichromatischen Farbsehen führt. Ein tetrachromatisches Farbsehen würde vier verschiedene Zapfentypen voraussetzen.

Arbeitsauftrag 3:

siehe nächste Seite.

			
<p>Gesunder Mann</p>	<p>Gesunde Frau</p>	<p>Rot-grün-blinder Mann: Grünzapfen fehlen</p>	<p>Gesunde Frau, evtl. leichte Grünschwäche</p>
			
<p>Rot-grün-blinder Mann: Rotzapfen fehlen</p>	<p>Gesunde Frau, evtl. leichte Rotschwäche</p>	<p>Rot-grün-blinde Frau: Grünzapfen fehlen</p>	<p>Rot-grün-blinde Frau: Rotzapfen fehlen</p>
			
<p>Tetrachromatische Frau mit zwei verschiedenen Rotzapfen</p>	<p>Tetrachromatische Frau mit zwei verschiedenen Grünzapfen</p>		