

Biophysik

neu



kostenfreie
LESEPROBE



Gymnasium Bayern

Inhalt

Vorwort	3
---------------	---

Physik – Gymnasium Bayern Sek II

Die Lehr- und Lernwelt von Biophysik neu	4
---	---

Konzeption

Aufbau des Lehrwerks.....	6
---------------------------	---

Biophysik neu

Inhaltsverzeichnis	8
Vorwort.....	11
Auftakt-Doppelseite A	12
Kapitel 3: Grenzen unserer Sehleistung	14
Vermischte Aufgaben A – Basisaufgaben	28
Vermischte Aufgaben A – Zusammenfassende Aufgaben	30
Selbsttest A	32
Zusammenfassung A	34

Digitaler Unterricht mit click & teach und click & study

Digitale Lehr- und Lernwelt von Biophysik neu	38
--	----

Physik 12

Unser WebSeminar-Angebot



Liebe Lehrerinnen und Lehrer,

in diese Jahr bieten wir Ihnen und Ihren Schülerinnen und Schülern mit **Biophysik neu** eine spannende Alternative zum regulären Physikunterricht. Um bei Wahl der Lehrplanalternative Biophysik die notwendigen Voraussetzungen sowohl zur Fortsetzung des regulären Physikkurses als auch zur Wahl des Kurses Astrophysik in der Jahrgangsstufe 13 zu schaffen, stellt **Biophysik neu** das Grundwissen aus dem regulären Kurs bereit.

Unser **digitales Lehrmaterial click & teach** unterstützt Sie optimal bei der Gestaltung Ihres Unterrichts. Selbstverständlich erscheint **Biophysik neu** auch als **digitale Ausgabe click & study** für Ihre Schülerinnen und Schüler.

Wenn Sie mehr über **Biophysik neu** erfahren möchten, kontaktieren Sie uns!
Wir beraten Sie gern.

Ihr Schulberatungsteam für Bayern



Dr. Katrin Brogl

Mobil: 0178 6012379
E-Mail: k.brogl@ccbuchner.de



Annette Goldscheider

Telefon: 0821 2593648
Mobil: 0171 6012371
E-Mail: goldscheider@ccbuchner.de



Kilian Jacob

Mobil: 0171 6012375
E-Mail: jacob@ccbuchner.de

Entdecken Sie die Lehr- und Lernwelt von...

Physik – Gymnasium Bayern Sek II

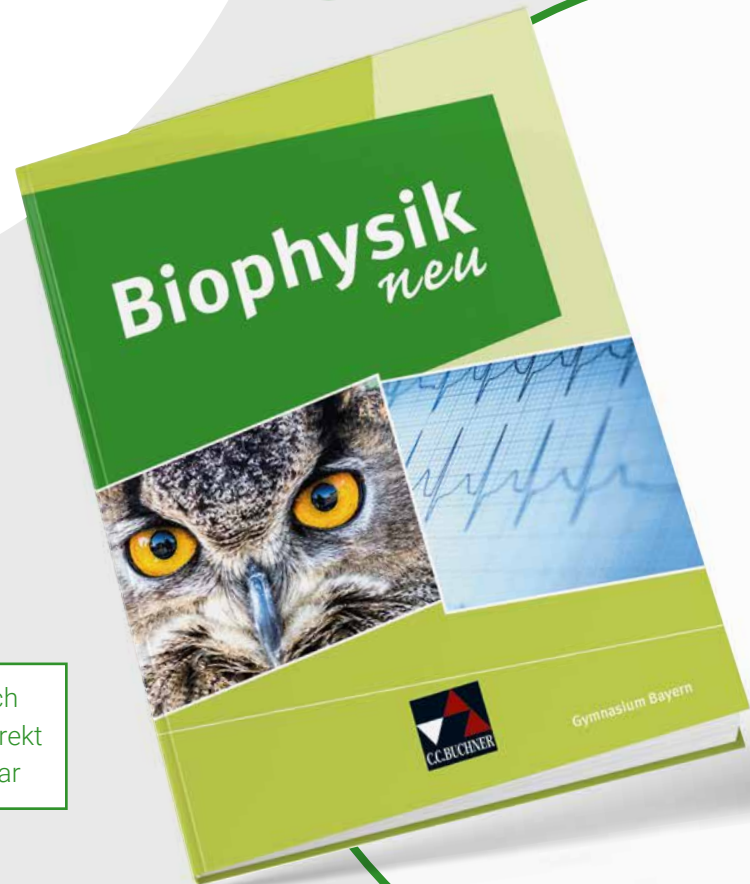
Biophysik neu

In der 12. Jahrgangsstufe kann nach den Vorgaben des LehrplanPLUS parallel zum regulären Physikkurs auch die Lehrplanalternative Biophysik unterrichtet werden. Dabei lernen die Schülerinnen und Schüler, wie mithilfe physikalischer Modelle die Funktionsweisen biologischer Systeme beschrieben und verstanden werden.



Mehr Infos:
www.ccbuchner.de/bn/67055

2025
neu für die
Oberstufe:
Astrophysik
neu



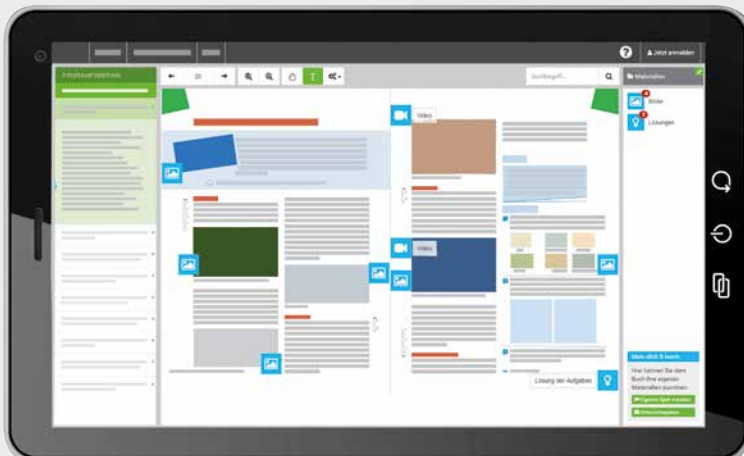
digitales Zusatzmaterial auch
via QR- oder Mediacodes direkt
in der Print-Ausgabe verfügbar



Ideal für den digitalen Materialaustausch

Die **digitale Ausgabe des Schülerbands click & study** und das **digitale Lehrmaterial click & teach** bilden zusammen die ideale digitale Lernumgebung: vielfältig im Angebot und einfach in der Bedienung!

Mehr Infos finden Sie auf den Seiten 38 bis 45 und auf www.click-and-study.de und www.click-and-teach.de.



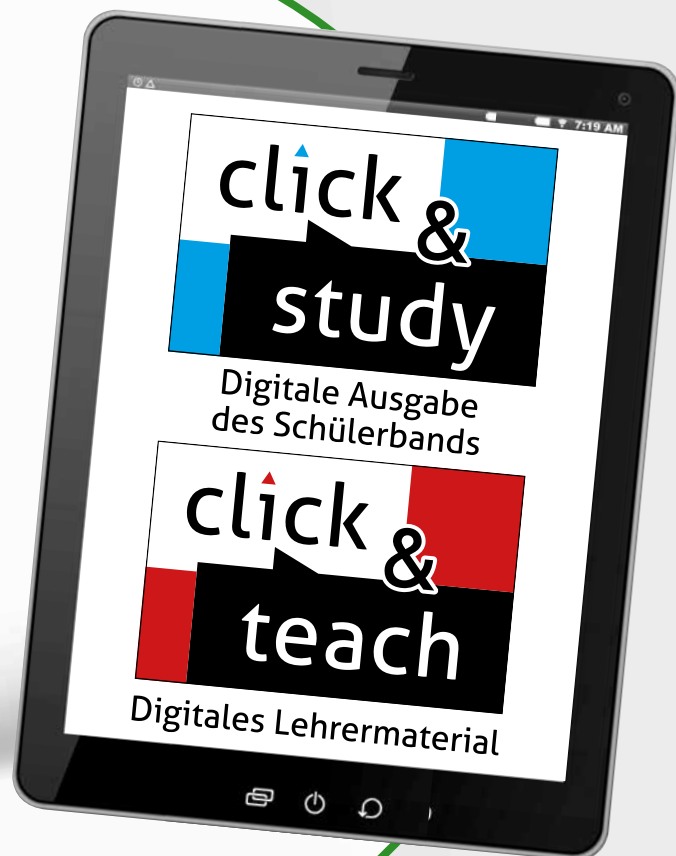
Erklärvideos **click & study**
und **click & teach**



Innovatives Konzept für einen praxisorientierten Unterricht

- ▶ ein innovatives Konzept zum eigenverantwortlichen Arbeiten
- ▶ ausführliche Anleitungen für eine selbstständige Durchführung und strukturierte Aufbereitung von Schülerexperimenten
- ▶ verlässliche Abdeckung der Kompetenzerwartungen
- ▶ die Einbindung grundlegender Fachmethoden für ein fundiertes und fachspezifisches Arbeiten
- ▶ mit Medien- und QR-Codes verlinkte digitale Materialien, z. B. Simulationen



click & study als Print-Plus-Lizenz
ab 2,20 € pro Titel und Jahr
bei Einführung der Print-Ausgabe



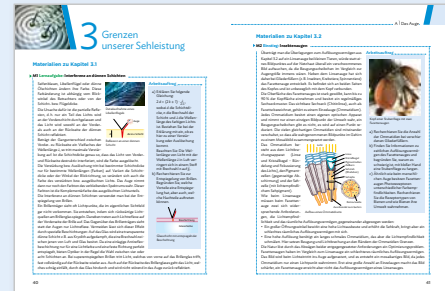
Titel	ISBN 978-3-661- / Bestellnr.	Ladenpreis	Lieferbarkeit
 Biophysik neu	67055-03	ca. 31,- €	3. Quartal 2024
 click & study Digitale Ausgabe Biophysik neu	WEB 670551 Bestellbar auf www.ccbuchner.de	ca. 8,50 €	3. Quartal 2024
 click & teach Digitales Lehrermaterial	WEB 670651 Diese und weitere Lizenzarten finden Sie auf www.ccbuchner.de	ca. 33,- €	3. Quartal 2024 (sukzessive)

So können Sie mit diesem Buch arbeiten

Jetzt geht es los

Versuche und Materialien

Ein Kapitel beginnt häufig mit diesen Seiten. Sie enthalten eine große Auswahl an Versuchsvorschriften und Materialien, immer begleitet durch eine Reihe von Auswertungsfragen. Die Inhalte sind immer einem Unterkapitel zugeordnet und sollten vor dem Unterkapitel bearbeitet werden. Sie können dadurch die neuen Inhalte selbstständig entdecken. Die Kompetenzerwartungen, die an Sie gestellt werden, werden hier in besonderem Maße abgedeckt. Dabei wird unterschieden zwischen **Einstiegen**, die an das Thema heranhelfen, und **Lernaufgaben**, bei denen Sie sich das Thema selbstständig erarbeiten. Speziell die Lernaufgaben sind sehr wichtig, um das nötige physikalische Verständnis des Themas zu erlangen. Wenn Sie selbst einen Versuch durchführen sollen, wird das mit einem **V** gekennzeichnet. Manchmal wird eine bestimmte Fachmethode benötigt, um den Arbeitsauftrag zu bearbeiten. Diese **Methode** wird dann in einem grünen Kasten auf der Seite vorgestellt und erklärt.

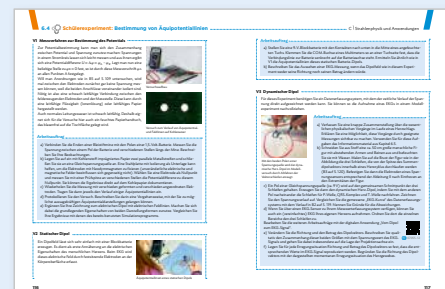


Ran an die Praxis

Schülerexperimente

Experimente sind in der Physik von entscheidender Bedeutung, um neue Erkenntnisse zu gewinnen. Deswegen gibt es auf diesen Seiten ausführliche Erläuterungen und Auswertungsfragen, mit denen Sie selbstständig die vorgestellten Experimente durchführen können.

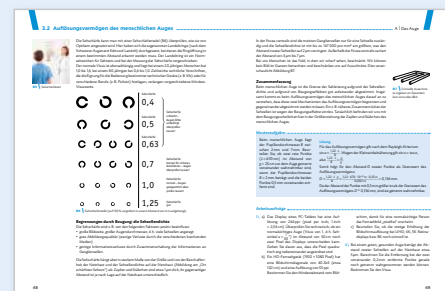
Auch hier werden die benötigten **Methoden** kurz vorgestellt.



Die Theorie

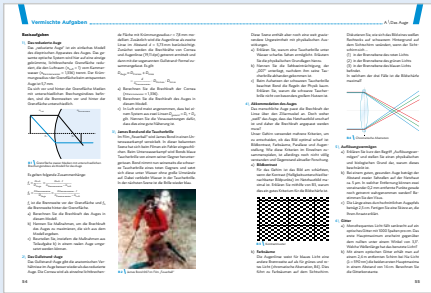
Erarbeitung

Auf diesen Seiten wird der neue Stoff erklärt, wir nennen sie daher auch Theorieseiten. Die von Ihnen durchgeführten Experimente und bearbeiteten Materialien werden dadurch besser verständlich. Damit Sie das Wichtigste gut lernen, gibt es auf jeder Doppelseite einen oder mehrere Kästen mit einem **Merksatz**. An ausgewählten Stellen finden Sie auch wieder einen grünen Kasten, der Ihnen eine benötigte **Methode** vorstellt. Bilder und Tabellen veranschaulichen die Inhalte und liefern Daten, kleine Info-Kästen am Rand bieten Zusatzinformationen zum Text. Zum Anwenden des neu gewonnen Wissens gibt es auf jeder Doppelseite passende **Arbeitsaufträge**, die teilweise wieder mit einem **V** gekennzeichnet sind. Es gibt blaue und schwarze Aufgaben. Zu den schwarzen Aufgaben finden Sie Lösungshinweise. Damit Sie lernen, wie Sie bei den Aufgaben vorgehen müssen, gibt es häufig auch eine **Musteraufgabe**, die das Vorgehen verdeutlicht.



Konzept

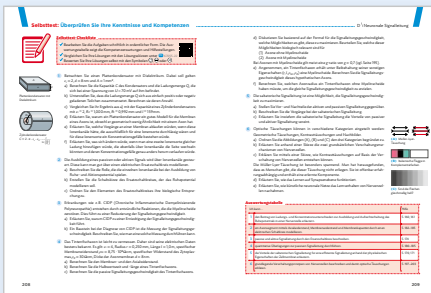
Alles klar?



Vermischte Aufgaben

Hier finden Sie zum Ende des Kapitels nochmal einige umfangreiche Aufgaben, die teilweise materialbasiert sind. Die „Basisaufgaben“ auf der ersten Seite sind etwas kürzer gehalten und befassen sich immer mit einem einzelnen Thema. Die „Zusammenfassenden Aufgaben“ können alle Themen des Kapitels aufgreifen und miteinander vernetzen. Sie helfen Ihnen also dabei, das im Kapitel Gelernte nochmal zu vertiefen und bereiten Sie dadurch gut auf den im Anschluss folgenden Selbsttest vor.

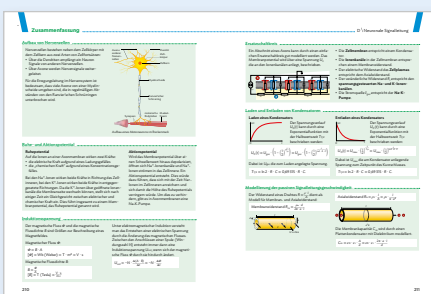
Ziel erreicht?



Selbsttest

Die Seiten helfen Ihnen dabei, festzustellen, ob Sie die neuen Inhalte des Kapitels verstanden haben. Es gibt zu jedem Kompetenzbereich Aufgaben, die Sie lösen und mit den bereitgestellten Lösungen abgleichen können. Sie können Ihre Leistung dabei selbst bewerten. Schneiden Sie in einem Bereich nicht so gut ab, bekommen Sie im Auswertungskasten Informationen, welche Stellen im Buch Sie nochmal genauer ansehen sollten.

Das weiß ich – das kann ich





Zusammenfassung


Die wichtigsten Inhalte und Kompetenzen, die Sie zum jeweiligen Thema gelernt haben, werden auf diesen Seiten kompakt zusammengefasst. Damit können Sie sich gut auf eine Klassenarbeit vorbereiten.


Bildlich gesprochen: Erklärung der Symbole

- V** Versuch, den Sie selbst durchführen können.
- !** Warnsymbol; befolgen Sie unbedingt den angegebenen Hinweis!
- i** Information; hier werden Ihnen zusätzliche Informationen geliefert.
- MC** Mediacode; die angegebene Nummer können Sie unter www.ccbuchner.de im Suchfeld eingeben (z. B. Eingabe „67055-09“) und gelangen so zu weiteren Materialien.

Vorwort	7
Sicher experimentieren in Physik	8
A Das Auge	10
1 Bildentstehung im Auge	
Materialien	12
1.1 Das Linsenauge	16
1.2 Abbildung auf der Netzhaut	18
1.3 Akkomodation und Fehlsichtigkeiten	22
1.4  Schülerexperiment: Abbildungen im Auge	28
2 Aufbau des menschlichen Auges	
Materialien	30
2.1 Aufbau der Retina	32
2.2 Farbsehen und additive Farbmischung	34
2.3 Das elektromagnetische Spektrum	38
3 Grenzen unserer Sehleistung	
Materialien	40
3.1 Beugung und Interferenz am Doppel- und Einfachspalt	42
3.2 Auflösungsvermögen des menschlichen Auges	46
3.3  Schülerexperiment: Auflösungsvermögen des Auges	50
3.4 Optimierung des Auflösungsvermögens im Tierreich	52
Vermischte Aufgaben	54
Selbsttest	58
Zusammenfassung	60

Inhalt

B Das Ohr	64
4 Grundlagen der Akustik	
Materialien	66
4.1 Grundlagen: Schallwellen und Frequenzspektren	68
4.2 Die Lautstärke und ihre Messung	74
5 EVA: Ohr und Gehör	
Fahrplan für dieses Kapitel	80
5.1 Funktion des Außenohrs	84
5.2 Aufbau und Funktion des Innenohrs	90
Vermischte Aufgaben	96
Selbsttest	100
Zusammenfassung	102
C Strahlenphysik und Anwendungen	104
6 Elektrische Felder	
Materialien	106
6.1 Beschreibung elektrischer Felder	108
6.2 Kapazität	112
6.3 Potential und Feldstärke	114
6.4  Schülerexperiment: Bestimmung von Äquipotentiallinien	116
6.5 Das EKG-Signal	118
7 Magnetische Felder	
Materialien	122
7.1 Magnetische Flussdichte und Lorentzkraft	124
7.2 Bewegung geladener Teilchen	126
7.3 Therapie mit ionisierender Strahlung	130
8 Röntgenstrahlung	
Materialien	134
8.1 Aufbau der Röntgenröhre, Röntgenspektrum	136
8.2 Biologische Wirkung von Röntgenstrahlung	140
Vermischte Aufgaben	144
Selbsttest	148
Zusammenfassung	150

D Neuronale Signalleitung	154
9 Nervenzellen	
Materialien	156
9.1 Aufbau von Nervenzellen	158
9.2 Ruhepotential	160
9.3 Induktionsspannung	164
9.4 Geschwindigkeit von Nervensignalen	168
10 Modell eines Neurons	
Materialien	172
10.1 Elektrischer Ersatzschaltkreis für ein Axonsegment	174
10.2 Physikalische Phänomene im Neuronmodell	176
10.3 Passive Signalleitung	180
10.4  Schülerexperiment: Widerstandsleiter	186
11 EVA: Erregungsleitung und Signalübertragung	
Fahrplan für dieses Kapitel	188
11.1 Aktive Signalleitung	190
11.2 Saltatorische Signalleitung	194
11.3 Verschaltungsprinzipien von Nervenzellen	196
Vermischte Aufgaben	204
Selbsttest	208
Zusammenfassung	210

Vorwort

Liebe Schülerinnen und Schüler,
liebe Lehrerinnen und Lehrer,

in den letzten Jahrzehnten sind in kaum einem Wissensgebiet so viele Fortschritte erzielt worden wie in der Biologie. Die dabei verwendeten Methoden gehen aber weit über die der klassischen Biologie hinaus, so dass man je nach Bereich besser von Biotechnologie, Biochemie oder Biophysik spricht. Längst sind daraus eigenständige Fachrichtungen entstanden, was sich auch in entsprechenden Studiengängen niederschlägt. Der aktuelle Lehrplan für die bayerischen Gymnasien trägt dieser Entwicklung Rechnung und bietet die Möglichkeit, in der 12. Jahrgangsstufe die Lehrplanalternative Biophysik zu wählen. Damit eröffnen sich neue Chancen, die genutzt werden können und sollten.

Sie sollten genutzt werden, weil immer mehr höchst attraktive Studiengänge und Berufsfelder Kenntnisse aus Biologie und Physik erfordern. Das gilt nicht nur für die „klassischen“ Tätigkeitsfelder in der Medizin. Auch die Medizintechnik bietet gute Aussichten für entsprechend ausgebildete Fachkräfte.

In der Schule lassen sich diese Chancen in mehrfacher Hinsicht nutzen: Zum einen öffnet die Biophysik den Blick dafür, dass die übliche Einteilung der Naturwissenschaften in Biologie, Chemie und Physik rein praktischer Art ist. Tatsächlich sind alle Dinge, ob Stein oder Zelle, den gleichen universellen Naturgesetzen unterworfen. Zum anderen ergeben sich aus der Vernetzung von Physik und Biologie sehr interessante neue Einsichten. Die Leistungen unserer Sinnesorgane kann jeder am eigenen Leib erfahren, und die physikalische Perspektive führt zu einem vertieften Verständnis dieser Leistungen; Technologien zur medizinischen Diagnose und Therapie sind jedem schon selbst oder im Bekanntenkreis begegnet.

Das vorliegende Buch stellt den Bezug zwischen Physik, Biologie und Medizin auch in den eher theoretischen Teilen immer wieder her. Seine Struktur orientiert sich eng am Lehrplan und deckt so alle verbindlichen Inhalte ab. Inhalte, die darüber hinausgehen, sind als Exkurs markiert.

Zentraler Bestandteil dieses Schulbuches sind die Übungsaufgaben, die durchweg aus der Unterrichtspraxis stammen und unterschiedlichste Kompetenzbereiche einbeziehen. Die Aufgaben werden durch ausführlich kommentierte Beispiele ergänzt.

Wir hoffen, dass alle Leserinnen und Leser – egal ob Schülerinnen und Schüler oder Kolleginnen und Kollegen – diesem Buch interessante Anregungen entnehmen können und wünschen uns, dass wir etwas von der Begeisterung, die wir selbst beim Unterrichten und Schreiben hatten, weitergeben konnten.

Viel Erfolg mit der Biophysik wünschen Ihnen
Autorinnen und Autoren

A \ Das Auge

Augenlinse Interferenz
 Linseauge additive Farbmischung Stäbchen
 Glaskörper Hornhaut Photorezeptoren Linsengleichungen
 Netzhautbild Dioptrie Zapfen
 Pupille Ziliarmuskel
 Brechkraft Netzhaut Linse-Schirm-Modell
 Zonulafasern Akkomodation Rayleigh-Kriterium
 dioptrischer Apparat subtraktive Farbmischung

Sie können in diesem Kapitel entdecken ...

- wie im Auge ein scharfes Netzhautbild entsteht.
- wie in der Netzhaut die Photonen, aus denen das Netzhautbild besteht, detektiert werden.
- wie sich verschiedene Augenarten an unterschiedliche Gegenstandsweiten anpassen, um ein scharfes Bild zu erzeugen.
- warum das Auflösungsvermögen unseres Auges begrenzt ist.
- wie sich die Augen verschiedener Lebewesen im Laufe der Evolution an unterschiedliche Lebensbedingungen angepasst haben.
- wie in der Physik mit Modellen gearbeitet wird.
- wie in der Optik mit digitalen Simulationen gearbeitet wird.





3 Grenzen unserer Sehleistung

Materialien zu Kapitel 3.1

► M1 Lernaufgabe: Interferenz an dünnen Schichten

Seifenblasen, Libellenflügel oder dünne Ölschichten ändern ihre Farbe. Diese Farbänderung ist abhängig vom Blickwinkel des Betrachters oder von der Schicht- bzw. Flügeldicke.

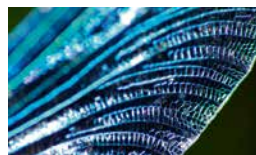
Die Ursache dafür ist die partielle Reflexion, d.h. nur ein Teil des Lichts wird an der Vorderschicht durchgelassen und das Licht wird sowohl an der Vorder- als auch an der Rückseite der dünnen Schicht reflektiert.

Beträgt der Gangunterschied zwischen Vorder- zu Rückseite ein Vielfaches der Wellenlänge λ , so tritt maximale Verstärkung auf. Ist die Schichtdicke genau so, dass das Licht von Vorder- und Rückseite destruktiv interferiert, wird die Farbe ausgelöscht.

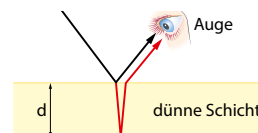
Die Verstärkung bzw. Auslöschung tritt bei bestimmter Schichtdicke nur für bestimmte Wellenlängen (Farben) auf. Variiert die Schichtdicke oder der Winkel der Blickrichtung, so verändert sich auch die Farbe des verstärkten bzw. ausgelöschten Lichts. Das Auge nimmt dann nur noch den Farbton des verbleibenden Spektrums wahr. Dieser Farbton ist die Komplementärfarbe des ausgelöschten Lichtanteils.

Die Interferenz an dünnen Schichten verwendet man bei der Entspiegelung von Brillen.

Ein Brillenträger sieht oft Lichtpunkte, die im eigentlichen Sichtfeld gar nicht vorkommen. Sie entstehen, indem sich rückwärtige Lichtquellen am Brillenglas spiegeln. Daneben treten auch Lichtreflexe auf der Vorderseite der Brille auf. Das Gegenüber des Brillenträgers sieht statt der Augen nur Lichtreflexe. Vermeiden lässt sich dieser Effekt durch spezielle Beschichtungen: Auf das Glas wird eine transparente dünne Schicht z. B. aus Kryolith aufgedampft, die eine Brechzahl zwischen jenen von Luft und Glas besitzt. Da eine einlagige Antireflexbeschichtung nur für eine Lichtfarbe und eine feste Richtung perfekt entspiegelt, bieten Optiker in der Regel die Wahl zwischen vier oder acht Schichten an. Bei superentspiegelten Brillen tritt Licht, welches von vorne auf das Brillenglas trifft, fast vollständig auf der Rückseite wieder aus. Auch auf der Rückseite des Brillenglases geht das Licht, welches schräg einfällt, durch das Glas hindurch und wird nicht störend in das Auge zurück reflektiert.



Detailaufnahme eines Libellenflügels



Reflexion an einer dünnen Schicht

Arbeitsauftrag

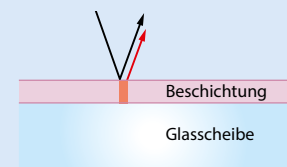
a) Erklären Sie folgende Gleichung:

$$2d = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2n},$$

wobei d die Schichtdicke, n die Brechzahl der Schicht und λ die Wellenlänge des farbigen Lichts ist. Beziehen Sie bei der Erklärung mit ein, ob es hier zu einer Verstärkung oder Auslöschung kommt.

Beachten Sie: Die Wellenlänge von Licht mit der Wellenlänge λ in Luft verringert sich in einem Stoff mit Brechzahl n auf $\frac{\lambda}{n}$.

b) Recherchieren Sie zur Entspiegelung von Brillen. Begründen Sie, welche Vorteile eine Entspiegelung hat, aber auch, welche Nachteile auftreten können.



Glasschicht mit entspiegelnder Beschichtung

Materialien zu Kapitel 3.2

► M2 Einstieg: Insektenaugen

Überträgt man die Überlegungen zum Auflösungsvermögen aus Kapitel 3.2 auf ein Linsenauge bei kleinen Tieren, würde statt eines Bildpunktes auf der Netzhaut überall ein verschwommenes Bild auftauchen, da die Beugungsscheibchen im Vergleich zur Augengröße immens wären. Neben dem Linsenauge hat sich daher bei Gliederfüßern (z. B. Insekten, Krebstiere, Spinnentiere) das Facettenauge entwickelt. Es befindet sich an beiden Seiten des Kopfes und ist unbeweglich mit dem Kopf verbunden.

Die Oberfläche des Facettenauges ist stark gewölbt, kann bis zu 90 % der Kopffläche einnehmen und besitzt ein regelmäßiges Sechseckmuster. Das sichtbare Sechseck (Chitinlinse), auch als Facette bezeichnet, gehört zu einem Einzelauge (Ommatidium). Jedes Ommatidium besitzt einen eigenen optischen Apparat und nimmt nur einen einzigen Bildpunkt der Umwelt wahr, ein Beugungsscheibchen gibt es nicht, es wird auf einen Punkt reduziert. Die vielen gleichartigen Ommatidien sind miteinander verschaltet, so dass alle wahrgenommenen Bildpunkte im Gehirn zu einem Mosaikbild zusammengesetzt werden.

Das Ommatidium besteht aus dem Lichtbrechungsapparat (Linse und Kristallkegel – Bündelung und Fokussierung des Lichts), den Pigmentzellen (gegenseitige Abschirmung) und der Sehzelle (mit lichtempfindlichem Sehpigment).

Wie beim Linsenauge müssen beim Facettenauge zwei sich widersprechende Anforderungen, die Lichtempfindlichkeit und das räumliche Auflösungsvermögen, gegeneinander abgewogen werden:

- Ein großer Öffnungswinkel bewirkt eine hohe Lichtausbeute und erhöht die Sehkraft, bringt aber ein schlechtes räumliches Auflösungsvermögen mit sich.
- Eine hohe Auflösung benötigt ein langes schmales Ommatidium, das aber die Lichtempfindlichkeit schmälert. Hier setzen Beugung und Lichtbrechung an den Rändern der Ommatidien Grenzen.

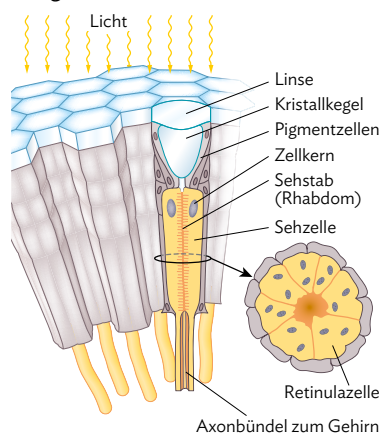
Die Natur löst durch das Abwägen beider entgegengesetzter Anforderungen ein Optimierungsproblem. Facettenaugen haben im Vergleich zum Linsenauge ein schlechteres räumliches Auflösungsvermögen. Das Bild wird beim Lichteintritt ins Auge aufgerastert, und es entsteht ein mosaikartiges Bild, da jedes Ommatidium nur einen Lichtpunkt wahrnimmt. Erst eine große Anzahl an Einzelaugen macht das Bild schärfer, ein Facettenauge erreicht aber nicht das Auflösungsvermögen eines Linsenauges.

Arbeitsauftrag



Kopf einer Stubenfliege mit zwei Facettenaugen

- Recherchieren Sie die Anzahl der Ommatidien bei verschiedenen Gliederfüßlern.
- Finden Sie Informationen zu zeitlichen Auflösungsvermögen des Facettenauges und begründen Sie, warum es schwierig ist, mit bloßer Hand eine Stubenfliege zu fangen.
- Ähnlich wie beim menschlichen Auge besitzen Facettenaugen Photorezeptoren unterschiedlicher Farbempfindlichkeiten. Recherchieren Sie die Rezeptortypen von Bienen und wie Bienen ihre Umwelt wahrnehmen.



Aufbau eines Ommatidiums

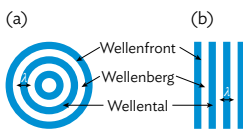
3.1 Beugung und Interferenz am Doppel- und Einfachspalt

Interferenz von Licht am Doppelspalt

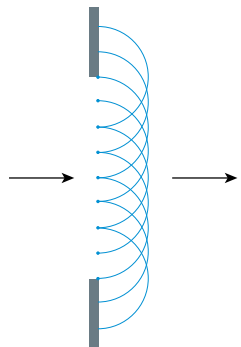
Zur Erinnerung:



B2 Interferenz zweier Kreiswellen mit charakteristischem strahlenförmigem Interferenzmuster

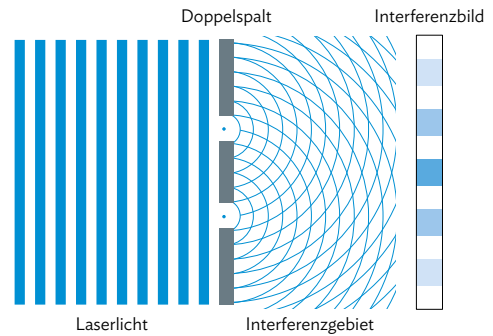


B3 Grundformen ebener Wellen: (a) Kreiswelle und (b) gerade Welle



B4 Veranschaulichung des Huygens'schen Prinzips am Beispiel einer ebenen Welle: Jeder Punkt auf der Wellenfront der ebenen Welle wird als Zentrum einer Elementarwelle gedeutet. Wegen der Überlagerung der Elementarwellen entsteht eine neue Wellenfront.

Eine Blende mit zwei schmalen, dicht nebeneinanderliegenden Spalten wird von einer Seite mit einem Laser beleuchtet (B1). Das Licht eines Lasers (kohärente Lichtquelle) entspricht einer ebenen Welle, bei der Wellenberge und Wellentäler parallel zueinander verlaufen und periodisch erzeugt werden. Die beiden Öffnungen des Doppelspalts können als Zentren von kreisförmigen Elementarwellen verstanden werden. Das Licht breitet sich jeweils hinter den feinen Öffnungen nicht geradlinig aus, sondern dringt kreisförmig auch in den Schattenraum ein (Beugung). Die beiden entstehenden Wellensysteme überlagern sich.



B1 Doppelspaltversuch: Auf dem Schirm entsteht das typische Interferenzmuster mit nach außen abnehmender Intensität

Auf dem Schirm zeigt sich eine sogenannte Interferenzfigur: eine Reihe von ausgedehnten Lichtflecken mit nach außen abnehmender Intensität.

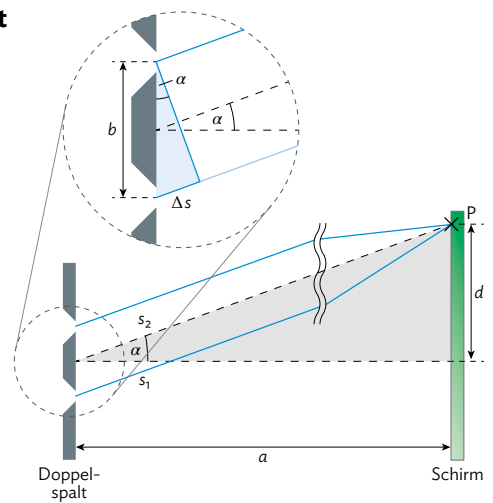
Interferenzbilder sind typisch für Wellen und haben – neben anderen Phänomenen – dazu geführt, Licht auch Welleneigenschaften zuzuschreiben.

Den Abstand zweier Wellenberge bezeichnet man als Wellenlänge λ . Wenn man sich – gedanklich – auf einen bestimmten Ort im Feld der Wellen fixiert, dann laufen kontinuierlich Wellenberge und Wellentäler vorbei. Der zeitliche Abstand zwischen zwei benachbarten Wellenbergen heißt Schwingungs- oder Periodendauer T . Daraus folgt für die Ausbreitungsgeschwindigkeit c die Beziehung $c = \frac{\lambda}{T}$.

Berechnungen am Doppelspalt

Mit diesen Kenntnissen ist man nun in der Lage, den Doppelspaltversuch genauer zu verstehen und sogar exakte Voraussagen über die Lage der Interferenzmaxima und -minima auf dem Schirm zu machen, wenn man die Maße der Anordnung und die Wellenlänge des Laserlichtes kennt.

Wählt man auf dem Schirm einen beliebigen Punkt, so haben die beiden Wellen von ihrem jeweiligen Zentrum, den Spaltöffnungen, die Wege s_1 und s_2 zurückgelegt (B5).



B5 Skizze zur Berechnung am Doppelspalt

Die Differenz zwischen beiden Wegen nennt man Gangunterschied Δs ; von ihm hängt das sich ergebende Interferenzbild ab:

Ist der Gangunterschied ein ganzzahliges Vielfaches von λ , also $k \cdot \lambda$ für $k = 0, 1, 2, \dots$, so treffen zwei gleichartige Zustände aufeinander und es kommt zur Verstärkung (konstruktive Interferenz).

Ist dagegen der Gangunterschied ein ungeradzahliges Vielfaches von $\frac{1}{2}\lambda$, also $\frac{1}{2}\lambda$,

$\frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \dots$, bzw. allgemein $\frac{(2k-1) \cdot \lambda}{2} = (2k-1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ für $k = 1, 2, 3, \dots$, so treffen zwei

entgegengesetzte Wellenzustände aufeinander und löschen sich gegenseitig aus (destruktive Interferenz).

Interferenzmaxima k -ter Ordnung

Ist die Entfernung a zwischen Doppelspalt und Schirm sehr groß im Vergleich zum Spaltabstand b , so verlaufen die beiden Wellenstrahlen s_1 und s_2 nahezu parallel. Das markierte Dreieck mit dem Winkel α an den Spalten kann dann als rechtwinklig angesehen werden. α ist dabei der zum entsprechenden Gangunterschied Δs gehörende Winkel. Es gilt dort für ein Interferenzmaximum:

$$\sin \alpha_k = \frac{\Delta s}{b} = \frac{k \cdot \lambda}{b} \quad (1)$$

Betrachtet man das große rechtwinklige Dreieck zwischen Doppelspalt und Schirm, das, wie man geometrisch herleiten kann, ebenso den Winkel α besitzt, so gilt:

$$\tan \alpha_k = \frac{d}{a} \quad (2)$$

Da üblicherweise $a \gg d$ ist, wird der Winkel α sehr klein und man kann mit der sogenannten Kleinwinkelnäherung rechnen: $\sin \alpha \approx \tan \alpha \approx \alpha$.

Gleichsetzen von (1) und (2) liefert damit:

$$\frac{k \cdot \lambda}{b} \approx \frac{d}{a}$$

Analog lässt sich die Gleichung für die Interferenzminima ermitteln.

Interferenzmaxima k -ter Ordnung:

$$\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{b} = \frac{d_k}{a} \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

Interferenzminima k -ter Ordnung:

$$\sin \alpha_k = \frac{(2k-1) \cdot \lambda}{2 \cdot b} \approx \frac{d_k}{a} \quad (k = 1, 2, \dots)$$

Durch Messen der Winkel α_k und der Abstände d_k und a können die abgeleiteten Beziehungen überprüft werden. Umgekehrt kann durch Messen von α_k und b die Wellenlänge λ des verwendeten Lichtes bestimmt werden. So ergibt sich z. B., dass sichtbares Licht Wellenlängen von etwa 380 nm (violett) bis 780 nm (rot) besitzt (T1).

Farbton	Wellenlänge in nm
Violett	380–420
Blau	420–80
Grün	480–560
Gelb	560–580
Orange	580–630
Rot	630–780

T1 Wellenlängen verschiedener Farbtöne

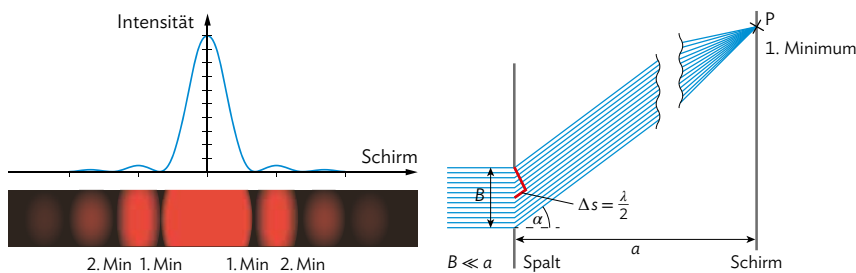
3.1 Beugung und Interferenz am Doppel- und Einfachspalt

Beugung und Interferenz am Einfachspalt

Die Iris des menschlichen Auges stellt aus physikalischer Sicht eine Lochblende dar. Gibt es auch bei einem Einfachspalt bzw. bei der Lochblende Interferenzerscheinungen? Zur Beantwortung dieser Frage beleuchten wir einen Einfachspalt mit einem Laserstrahl.

Auf dem Schirm sehen wir neben einem Hauptmaximum (Maximum 0. Ordnung) zu beiden Seiten Nebenmaxima mit wesentlich geringerer Intensität und Breite (B6).

Verengt man den Spalt, so werden die Streifen breiter und bewegen sich nach außen. Trifft eine ebene Wellenfront auf einen Einfachspalt der Breite B , so kann man das entstehende Interferenzbild hinter dem Spalt ebenfalls dadurch erklären, dass von vielen Punkten im Spalt Elementarwellen ausgehen, die sich auf dem Schirm teilweise konstruktiv, teilweise destruktiv überlagern.



B6 \ Intensitätsverteilung beim Einfachspalt

B7 \ Zur Minimumsbedingung am Einfachspalt

Zur Erklärung der Intensitätsmaxima und -minima nehmen wir zur Vereinfachung an, dass vom Spalt 12 Elementarwellen ausgehen und dass die Entfernung zum Schirm im Vergleich zur Spaltbreite sehr groß ist. Damit können die Wege der Wellen von den Wellenzentren zu einem bestimmten Punkt P auf dem Schirm näherungsweise als parallel verlaufend angesehen werden.

Beim Hauptmaximum mit dem Winkel $\alpha = 0^\circ$ haben die 12 Wellen keinen Gangunterschied, sie verstärken sich maximal. Mit zunehmendem Winkel steigt der Anteil an destruktiver Interferenz, weil es nun Gangunterschiede gibt. Ist der Winkel α so groß geworden, dass der Gangunterschied zwischen dem 1. und dem 7. Wellenzug, dem 2. und dem 8. usw. gerade $\frac{\lambda}{2}$ beträgt, löschen sie sich paarweise aus. Bei diesem Winkel finden wir bei P das 1. Minimum (B7).

Mit dieser Überlegung erhält man (analog zum Doppelspaltversuch) im genäherten rechtwinkligen Dreieck am Spalt die Bedingung für das Minimum erster Ordnung:

$$\sin \alpha = \frac{\Delta s_{1-7}}{B} = \frac{\frac{\lambda}{2}}{\frac{B}{2}} = \frac{\lambda}{B} \Leftrightarrow \lambda = B \cdot \sin \alpha$$

Für die Minima höherer Ordnung gilt analog:

$$k \cdot \lambda = B \cdot \sin \alpha_k \quad \text{mit } k = 2, 3, \dots$$

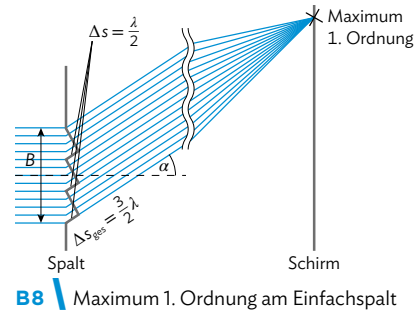
Zusammengefasst ergibt sich:

$$\text{Minima beim Einfachspalt: } k \cdot \lambda = B \cdot \sin \alpha_k \quad \text{mit } k = 1, 2, 3, \dots$$

A \ Das Auge

Nebenmaxima

Zwischen den Minima liegen die Maxima, in denen das Licht konstruktiv interferiert. Das erste Nebenmaximum (B8) entsteht dann, wenn zwischen dem 1. und 5., dem 2. und 6., dem 3. und 7. und dem 4. und 8. Wellenzug der Gangunterschied jeweils $\frac{\lambda}{2}$ beträgt: Sie löschen sich paarweise aus. Die Wellenzüge vom 9. bis 12. Spaltbereich bleiben übrig. Der Winkel $\alpha_{1\max}$, unter dem das erste Nebenmaximum zu finden ist, ergibt sich aus der Bedingung: $B \cdot \sin(\alpha_{1\max}) = \frac{3\lambda}{2}$. Wegen der teilweisen Auslöschung ist die Intensität erheblich kleiner als im Hauptmaximum. Allgemein gilt für die



Nebenmaxima beim Einfachspalt: $(2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} = B \cdot \sin \alpha_k$ mit $k = 1, 2, 3, \dots$

Musteraufgabe

Ein Einfachspalt wird mit rotem Laserlicht der Wellenlänge $\lambda = 670 \text{ nm}$ beleuchtet. Die Spaltbreite B soll ermittelt werden. Dazu wird das Interferenzmuster auf einem $a = 2,50 \text{ m}$ entfernten Schirm betrachtet. Der Abstand vom 2. Minimum bis zum gegenüberliegenden 2. Minimum beträgt $6,4 \text{ cm}$.

Lösung

Der Abstand vom Hauptmaximum zum 2. Minimum beträgt $3,2 \text{ cm}$. Für das 2. Minimum gilt

$$\tan \alpha_2 = \frac{0,032 \text{ m}}{2,5 \text{ m}} = 0,0128 \Rightarrow \alpha_2 = 0,73^\circ$$

$$\frac{2 \cdot \lambda}{B} = \frac{0,032 \text{ m}}{a} \quad (\text{Kleinwinkelnäherung})$$

$$\Rightarrow B = \frac{2 \cdot \lambda \cdot a}{0,032 \text{ m}} = 8,375 \cdot 10^{-5} \text{ m} \approx 0,08 \text{ mm}$$

Arbeitsaufträge

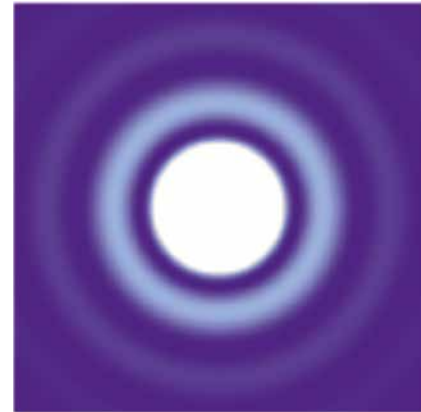
- 1\ Bei einem Doppelspaltversuch ist der Abstand des Schirmes von den beiden Spalten $3,6 \text{ m}$, der Abstand der Spalte $0,25 \text{ mm}$ und jener der beiden ersten Minima $7,6 \text{ mm}$.
 - a) Begründen Sie, dass es besser ist, den Abstand der zwei ersten Minima zu messen statt den Abstand des ersten Minimums zum Hauptmaximum.
 - b) Berechnen Sie die Wellenlänge des verwendeten Lichts und ermitteln Sie dessen Farbe.
 - c) Bestimmen Sie, welchen Abstand die beiden Maxima erster Ordnung und die beiden Minima zweiter Ordnung haben müssen.
- 2\ Mit einem Doppelspalt werden im Abstand $5,4 \text{ m}$ auf einem Schirm Interferenzmaxima erzeugt, deren Abstand $6,8 \text{ mm}$ beträgt.
 - a) Bestimmen Sie den Abstand der beiden Spalte, wenn Na-Licht ($\lambda = 590 \text{ nm}$) benutzt wird.
 - b) Geben Sie an, wie viele Maxima höchstens auftreten können.
- 3\ a) Erläutern Sie anhand einer Skizze, wie bei einem geeigneten Einfachspalt, der mit Laserlicht beleuchtet wird, das Minimum erster Ordnung entsteht.
 - b) Bei obigem Versuch mit einem Einfachspalt beträgt die Breite des Hauptmaximums 50 mm . Das verwendete rote Laserlicht hat eine Wellenlänge von 670 nm und der Schirm ist 4 m von der Spaltblende entfernt. Berechnen Sie die Spaltbreite des Einfachspaltes und begründen Sie die von Ihnen verwendeten Näherungen.
 - c) Nun wird bei gleichem Aufbau der rote gegen einen grünen, kurzwelligeren Laser ausgetauscht. Erläutern und begründen Sie ohne erneute Rechnung, welche Spaltbreite nun verwendet werden muss, damit das Hauptmaximum die gleiche Breite hat.

3.2 Auflösungsvermögen des menschlichen Auges

Begrenzungen des Auflösungsvermögens durch Beugung an der Pupille

Beugung tritt nicht nur am Spalt auf, sondern auch an kreisförmigen Blenden wie z. B. an der menschlichen Iris oder bei optischen Instrumenten. Das Bild besteht aus einem zentralen Scheibchen als Hauptmaximum mit umgebenden konzentrischen Kreisen als Nebenmaxima (B1).

Der Winkel α , bei dem das erste Minimum auftritt, hängt, ähnlich wie beim Spalt, von der Wellenlänge und dem Durchmesser des Kreises ab. Zusätzlich muss aber ein Korrekturfaktor berücksichtigt werden. Dieser rührt von der kreisförmigen Öffnung her und wird wegen der komplexen Herleitung hier nur angegeben:



B1 Beugungsbild einer kreisförmigen Öffnung

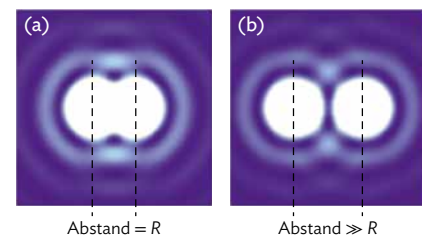
Minima an der Lochblende:

1. Ordnung: $\Delta s = B \cdot \sin \alpha = 1,22 \cdot \lambda$
2. Ordnung: $\Delta s = B \cdot \sin \alpha = 2,23 \cdot \lambda$
3. Ordnung: $\Delta s = B \cdot \sin \alpha = 3,24 \cdot \lambda$

Eine wichtige Konsequenz ist, dass bei allen optischen Instrumenten, und damit auch beim menschlichen Auge, das Auflösungsvermögen und die Bildentstehung durch die Beugung an Blenden und Linsenfassungen begrenzt sind. Gegenstandspunkte werden nicht in Bildpunkte, sondern in Beugungsfiguren mit einer gewissen räumlichen Ausdehnung abgebildet. Man kann Bilder zweier Gegenstandspunkte nur dann räumlich getrennt wahrnehmen, wenn die Beugungsfiguren (Beugungsscheibchen) ausreichend getrennt voneinander sind. Hierbei spricht man von der Sehschärfe des Auges.

Zwei Bildpunkte sind nur dann getrennt voneinander wahrnehmbar, wenn das Hauptmaximum des einen Beugungsscheibchens mindestens in das 1. Minimum des zweiten Scheibchens fällt.

Dies lässt sich auch so formulieren: Zwei Beugungsscheibchen sind nur dann noch zu unterscheiden, wenn ihre Hauptmaxima mindestens um ihren Radius R voneinander entfernt sind (B2). Man spricht hierbei vom Rayleigh-Kriterium.



B2 Interferenzbild und Intensitätsverlauf zweier Beugungsfiguren, die (a) gerade getrennt wahrnehmbar (b) deutlich zu unterscheiden sind

Zu der Entfernung zweier Punkte, unter der man die beiden Punkte noch unterscheiden kann, gehört ein minimaler Sehwinkel α (B3).

Für das menschliche Auge ergeben sich daraus Einschränkungen, die nun genauer betrachtet werden sollen. Für das Minimum der Beugungsfigur auf der Netzhaut gilt:

$$\Delta s = B \cdot \sin \alpha = 1,22 \cdot \lambda$$

Wegen des sehr kleinen Winkels α folgt (B4):

$$\sin \alpha = \frac{1,22 \cdot \lambda}{B} = \frac{R}{b} = \frac{D}{g}$$

Mit dieser Gleichung lassen sich für das menschliche Auge einfache Überlegungen anstellen. Wir nehmen für den Pupillendurchmesser $B = 5,0 \text{ mm}$ und für den Augendurchmesser $b = 2,5 \text{ cm}$ an. Verwendet man z. B. gelbes Licht ($\lambda = 550 \text{ nm}$), so erhält man folgende Ergebnisse:

Radius des Beugungsscheibchens:

$$R = \frac{1,22 \cdot \lambda \cdot b}{B} = \frac{1,22 \cdot 550 \text{ nm} \cdot 2,5 \text{ cm}}{5 \text{ mm}} \approx 3,4 \mu\text{m}$$

kleinster auflösbarer Winkel aus $\sin \alpha = \frac{R}{b} \Rightarrow \alpha \approx 0,008^\circ \approx 0,5'$

Zwei Punkte im Abstand $g = 5 \text{ m}$ müssen somit $D = g \cdot \sin \alpha = 0,67 \text{ mm}$ auseinanderliegen, um getrennt wahrgenommen zu werden. Aufgrund der üblicherweise sehr kleinen Werte wird der Sehwinkel α in Bogenminuten angegeben.

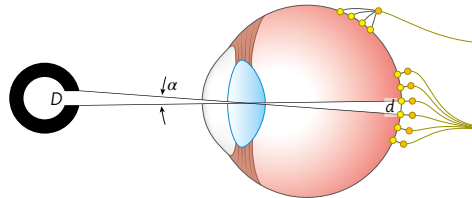
Die Größe der Beugungsscheibchen hängt vom Verhältnis des Augendurchmessers b und des Pupillendurchmessers B ab; es ist umso kleiner, je kleiner das Verhältnis $\frac{b}{B}$ ist. Beugungseffekte werden also am besten durch eine Vergrößerung der Augenöffnung verringert.

Praxis

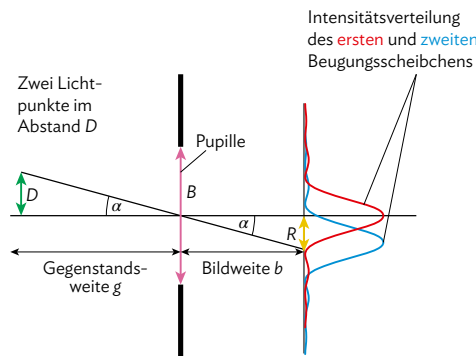
In der Praxis wird mit dem minimalen Sehwinkel α (der sogenannten Winkelsehschärfe) die Sehschärfe (Visus) definiert: $\text{Visus} = \frac{1'}{\alpha}$.

Der Visus ist damit eine reine Zahl ohne physikalische Dimension.

Ein normalsichtiges Auge kann bei guten Sehverhältnissen zwei Punkte unter dem Winkel einer Bogenminute noch unterscheiden, was einen Visus von 1 bedeutet. Ein Visus von $\leq 0,8$ bedeutet Schwächen in der Sehschärfe, die durch eine Sehhilfe ausgeglichen werden sollten. Bei Jugendlichen liegt der Visus hingegen häufig sogar über 1.



B3 Landolt-Ring zur Sehschärfebestimmung. Die Spaltbreite D wird als kleine Strecke d auf der Retina abgebildet



B4 Auflösung zweier unterscheidbarer Punkte

i

$$1' = \frac{1}{60}^\circ$$

3.2 Auflösungsvermögen des menschlichen Auges



B5 | Sehschärfetest

Die Sehschärfe kann man mit einer Sehschärfentafel (B6) überprüfen, wie sie von Optikern eingesetzt wird. Hier haben sich die sogenannten Landoltringe (nach dem Schweizer Augenarzt Edmund Landolt) durchgesetzt, bei denen die Ringöffnung in einem bestimmten Abstand erkannt werden muss. Der Landoltring ist ein Normsehzeichen für Sehtests und bei der Messung der Sehschärfe vorgeschrieben.

Der normale Visus ist altersabhängig und liegt bei einem 20-jährigen Menschen bei 1,0 bis 1,6, bei einem 80-jährigen bei 0,6 bis 1,0. Zahlreiche rechtliche Vorschriften, die die Eignung für die Bedienung bestimmter technischer Geräte (z. B. Kfz) oder für verschiedene Berufe (z. B. Polizist) festlegen, verlangen vorgeschriebene Mindestvisuswerte.

			Sehschärfe 0,4	} Sehschärfe: schlecht – Augen bitte unbedingt überprüfen lassen!		
			Sehschärfe 0,5			
			Sehschärfe 0,63			
				0,7	Sehschärfe: Grenze für sicheres Autofahren – Augen überprüfen lassen!	
					1,0	Sehschärfe: normal – Augen gelegentlich über- prüfen lassen!
					1,25	Sehschärfe: gut

B6 | Sehschärfentafel (auf 150 % vergrößert in einem Abstand von 4 m aufgehängt)

Begrenzungen durch Beugung: die Sehzellendichte

Die Sehschärfe wird z. B. von den folgenden Faktoren positiv beeinflusst:

- große Bildweite, großer Augendurchmesser, d. h. viele Sehzellen angeregt
- gute Abbildungsqualität (wenige Verluste durch die verschiedenen brechenden Medien)
- geringe Informationsverluste durch Zusammenschaltung der Informationen an Ganglienzellen.

Die Sehschärfe hängt aber in starkem Maße von der Größe und von der Beschaffenheit der Netzhaut und der Sehzellendichte auf der Netzhaut (Abbildung am „Ort schärfsten Sehens“) ab. Zapfen und Stäbchen sind etwa 1 µm dick, ihr gegenseitiger Abstand ist je nach Lage auf der Netzhaut unterschiedlich.

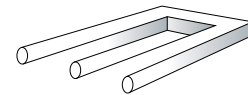
A \ Das Auge

In der Fovea centralis sind die meisten Ganglienzellen nur für eine Sehzelle zuständig und die Sehzellendichte ist mit bis zu 147 000 pro mm^2 am größten, was den Abstand zweier Sehzellen auf $2\ \mu\text{m}$ verringert. Außerhalb der Fovea centralis variiert der Abstand von $3\ \mu\text{m}$ bis $7\ \mu\text{m}$.

Bei uns Menschen ist das Feld, in dem wir scharf sehen, beschränkt. Wir können kein Bild im Ganzen betrachten und beschränken uns auf Ausschnitte. Dies veranschaulicht Abbildung B7.

Zusammenfassung

Beim menschlichen Auge ist die Grenze der Sehleistung aufgrund der Sehzellendichte und aufgrund von Beugungseffekten gut aufeinander abgestimmt. Insgesamt kommt es beim Auflösungsvermögen des menschlichen Auges darauf an zu verstehen, dass diese zwei Mechanismen das Auflösungsvermögen begrenzen und gegeneinander abgestimmt werden müssen. Ein z. B. näheres Zusammenrücken der Sehzellen ist wegen der Beugungseffekte sinnlos. Tatsächlich befinden wir uns mit dem Beugungsscheibchen hier in der Größenordnung der Zapfen und Stäbchen des menschlichen Auges.



B7 | Sinnvolle Ausschnitte ergeben im Gesamten kein sinnvolles Bild

Musteraufgabe

Beim menschlichen Auge liegt der Pupillendurchmesser B zwischen $2\ \text{mm}$ und $7\ \text{mm}$. Beurteilen Sie, ob zwei rote Punkte ($\lambda = 670\ \text{nm}$) im Abstand von $g = 25\ \text{cm}$ vor dem Auge getrennt voneinander wahrnehmbar sind, wenn der Pupillendurchmesser $B = 2\ \text{mm}$ beträgt und die beiden Punkte $0,5\ \text{mm}$ voneinander entfernt sind.

Lösung

Für das Auflösungsvermögen gilt nach dem Rayleigh-Kriterium

$$\sin \alpha = \frac{1,22 \cdot \lambda}{B}. \text{ Wegen der Kleinwinkelnäherung gilt } \sin \alpha \approx \tan \alpha, \\ \text{ also } \frac{1,22 \cdot \lambda}{B} = \frac{D}{g}.$$

Somit folgt für den Abstand D zweier Punkte als Grenzwert des Auflösungsvermögens:

$$D = \frac{1,22 \cdot \lambda \cdot g}{B} = \frac{1,22 \cdot 670 \cdot 10^{-9}\ \text{m} \cdot 0,25\ \text{m}}{0,002\ \text{m}} = 0,136\ \text{mm}.$$

Da der Abstand der Punkte mit $0,5\ \text{mm}$ größer ist als der Grenzwert des Auflösungsvermögens $D = 0,136\ \text{mm}$, sind sie getrennt wahrnehmbar.

Arbeitsaufträge

- 1) a) Das Display eines PC-Tablets hat eine Auflösung von 264 ppi (pixel per inch; $1\ \text{inch} = 2,54\ \text{cm}$). Überprüfen Sie rechnerisch, ob ein normalsichtiges Auge (Visus von 1, d. h. Sehwinkel $\alpha = \frac{1}{60}^\circ$) im Abstand von $30\ \text{cm}$ noch zwei Pixel des Displays unterscheiden kann. Gehen Sie davon aus, dass die Pixel quadratisch eng nebeneinander angeordnet sind.
- b) Ein HD-Fernsehgerät (1920×1080 Pixel) hat eine Bildschirmdiagonale von 40 Zoll (etwa $102\ \text{cm}$) und eine Auflösung von 55 ppi. Bestimmen Sie den Mindestabstand vom Bildschirm, damit für eine normalsichtige Person das Fernsehbild „pixelfrei“ erscheint.
- c) Beurteilen Sie, ob die stetige Erhöhung der Bildschirmauflösung bei UHD, 4K, 5K Retinadisplays bzw. 8K noch sinnvoll ist.
- 2) Bei einem guten, gesunden Auge beträgt der Abstand zweier Sehzellen auf der Netzhaut etwa $5\ \mu\text{m}$. Berechnen Sie die Entfernung bei der zwei voneinander $0,2\ \text{mm}$ entfernte Punkte gerade noch getrennt wahrgenommen werden können. Bestimmen Sie den Visus.

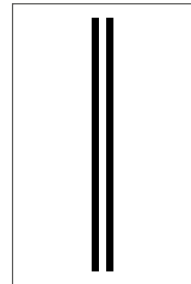
3.3 Schülerexperiment: Auflösungsvermögen des Auges

V1 Bestimmung des Auflösungsvermögens des menschlichen Auges

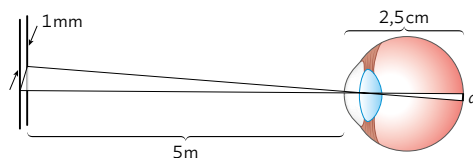
Da die Sehzellendichte (Kapitel 3.2) ein entscheidender Faktor beim Sehen ist, wollen wir für ein normalsichtiges Auge durch einen einfachen Versuch selbst die Sehzellendichte auf unserer Netzhaut angenähert bestimmen.

In der Abbildung rechts sind zwei Linien abgebildet, deren Abstand 1 mm beträgt. Entfernt man sich von den beiden Linien, wird es einen Moment geben, in dem man sie nicht mehr getrennt voneinander wahrnehmen kann. In diesem Fall wird die Bildinformation der beiden Linien nicht mehr erfasst, da dann die zwei angeregten Sehzellen nicht mehr durch eine dazwischenliegende, nicht angeregte Sehzelle getrennt sind.

Misst man die Entfernung, aus der man die beiden Linien gerade nicht mehr getrennt voneinander wahrnehmen kann, lässt sich der Abstand d zweier Sehzellen ausgehend vom Strahlensatz abschätzen (Abbildung unten). Hierbei werden weitere Effekte (z. B. Beugung, Raumhelligkeit) nicht berücksichtigt.



Linien (Abstand 1 mm) für die Bestimmung der Sehzellenanzahl



Skizze zum Strahlensatz beim menschlichen Auge

$$\text{Strahlensatz: } \frac{d}{2,5\text{ cm}} = \frac{1\text{ mm}}{G}$$

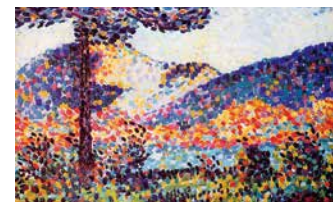
Eine erwachsene Person kann die beiden Linien meist im Abstand von 5 m nicht mehr getrennt voneinander wahrnehmen. Bei Fehlsichtigkeiten wie Kurzsichtigkeit ist der minimale Abstand zum Linienpaar kleiner als 5 m, und man erhält aus der Rechnung einen zu großen Abstand der Sehzellen.

Arbeitsauftrag

- Bestimmen Sie durch Messen den minimalen Abstand G vom Linienpaar, in welchem Sie die beiden Linien in B1 nicht mehr getrennt voneinander wahrnehmen können.
- Berechnen Sie mithilfe des Strahlensatzes den Abstand d zweier Sehzellen.
- Ermitteln Sie, wie viele Sehzellen sich auf einer Länge von 1 mm befinden.
- Berechnen Sie damit eine Abschätzung, wie viele Sehzellen sich auf 1 mm^2 Ihrer Netzhaut befinden.

Exkurs: Pointillismus

Der Pointillismus (um 1900) ist eine Stilrichtung der Malerei, bei der das gesamte Bild aus regelmäßigen Farbtupfern im Abstand von z. B. $D = 2\text{ mm}$ besteht. Der gesamte Farbeindruck ergibt sich erst beim Betrachten aus einer gewissen Entfernung, wenn die Punkte nicht mehr getrennt voneinander wahrnehmbar sind und miteinander verschmelzen. Für das Auflösungsvermögen gilt nach dem Rayleigh-Kriterium $\sin \alpha = \frac{1,22 \cdot \lambda}{B} = \frac{D}{g}$.



„Landschaft“ – pointillistisches Gemälde von Henri Edmond Cross

Daraus erkennt man, dass eine kleinere Wellenlänge λ auch einen kleineren Winkel minimaler Auflösung zur Folge hat. Das Vermischen der Punkte setzt daher zuerst bei den roten ($\lambda = 700\text{ nm}$) Punkten und zuletzt bei den violetten ($\lambda = 400\text{ nm}$) ein.

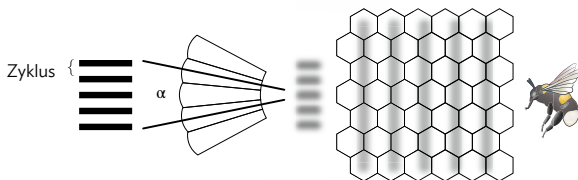
Für die Gegenstandsweite g , in der die Punkte gerade noch getrennt voneinander wahrnehmbar sind (bei einem Pupillendurchmesser von $B = 3 \text{ mm}$), folgt somit:

$$g_{\text{rot}} = \frac{D \cdot B}{1,22 \cdot \lambda} = \frac{2 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm}}{1,22 \cdot 700 \text{ nm}} = 11,7 \text{ m} \quad \text{und} \quad g_{\text{violett}} = \frac{D \cdot B}{1,22 \cdot \lambda} = \frac{2 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm}}{1,22 \cdot 400 \text{ nm}} = 12,3 \text{ m}$$

Ist der Abstand des Betrachters vom Bild geringer als 11,7 m, so werden alle Punkte noch getrennt voneinander wahrgenommen. Beträgt der Abstand mehr als 12,3 m, so sind die Punkte verschmolzen und der gesamte Farbeindruck wird erkennbar. Im Bereich dazwischen werden Teile des Bildes als Gesamtbild wahrgenommen, einzelne Bereiche aber noch als Punkte erkannt.

Exkurs: Sehschärfenermittlung bei Tieren

In der Tierforschung wird oft noch eine andere Form der Sehschärfenermittlung durchgeführt: Dabei wird dem Probanden in 25 cm Entfernung ein Schwarz-Weiß-Linienmuster vorgelegt, das ab einem bestimmten Linienabstand grau erscheint. Die Sehschärfe gibt dann an, wie viele Streifen in ein Sehfeld von 1° hineinpassen, sobald die Streifen zu Grau verschwimmen. Die Einheit ist cpd, d. h. Zyklen („Streifen“) pro Grad Sehwinkel.



Erklärung der Einheit cpd

Spezies	Sehschärfe in cpd
Keilschwanzadler	143
Habichtfalke	73
Mensch	50–70
Schimpanse	64
Giraffe	25
Hund	15
Pferd	9
Katze	5
Wanderratte	1,6
Hausmaus	0,5
Honigbiene	0,5
Stubenfliege	0,2

Die Unterschiede zwischen den Arten sind hauptsächlich auf eine Anpassung an ihren spezifischen Lebensraum, insbesondere die zur Verfügung stehende Lichtmenge, zurückzuführen.



Mensch

Katze

Maus

Fliege

Sehschärfe von Katze, Maus und Fliege im Vergleich zum Menschen

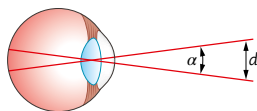
3.4 Optimierung des Auflösungsvermögens im Tierreich

Das Auflösungsvermögen des Auges

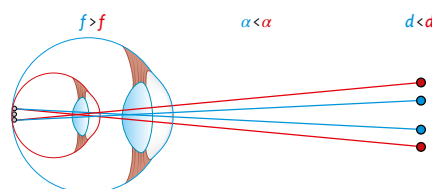
Drei Aspekte sind für das Auflösungsvermögen des Auges entscheidend:

- der Abstand der Beugungsscheibchen zweier getrennt wahrzunehmender Punkte auf der Netzhaut
- die Größe der Beugungsscheibchen auf der Netzhaut
- der Abstand der Photorezeptoren.

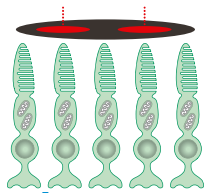
Gemäß dem Rayleigh-Kriterium (Kap. 3.2) muss der Abstand der Beugungsscheibchen zweier Punkte größer als der Radius der Beugungsscheibchen sein, um getrennt wahrgenommen zu werden. Daher kann das Auflösungsvermögen optimiert werden, indem der Abstand der Beugungsscheibchen vergrößert wird. Der Abstand zweier Bildpunkte auf der Netzhaut hängt vom Sehwinkel α ab (B1). Dabei ist die Winkelschärfe derjenige Sehwinkel, bei dem zwei Objekte gerade noch als getrennt wahrgenommen werden. Sie ist bei kleinen Augen geringer als bei großen (B2). Daher ist Größe beim Linsenauge von Vorteil.



B1 Definition des Sehwinkels α



B2 Zusammenhang zwischen Winkelschärfe und Augengröße

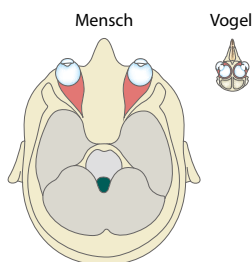


B3 Zusammenhang zwischen Abstand der Beugungsscheibchen und Abstand der Photorezeptoren

Für den Radius R des Beugungsscheibchens gilt: $R = 1,22 \cdot \lambda \cdot \frac{b}{D} \approx 1,22 \cdot \lambda \cdot \frac{f}{D}$. Da sich mit der Augengröße im Allgemeinen sowohl die Brennweite f als auch der Pupillendurchmesser D erhöhen, ist bei großen Augen der Effekt des vergrößerten Abstandes von Bildpunkten ausgeprägter als die Vergrößerung des Beugungsscheibchens. Um zwei Punkte gerade noch scharf sehen zu können, werden mindestens drei Photorezeptoren benötigt (B3), jeder mit einer 1:1-Verschaltung zu den ableitenden Nervenfasern. Die Grenze des Auflösungsvermögens ist dadurch gegeben, dass zwei Photorezeptoren jeweils im Zentrum eines Beugungsscheibchens, ein dritter in dem etwas weniger hellen Bereich dazwischen positioniert sein müssen. Der Photorezeptorabstand wird dadurch nach unten begrenzt, dass bei einem Durchmesser von weniger als $1 \mu\text{m}$ die Wellenleiterqualität des Photorezeptors abnimmt. Das hat zur Folge, dass ein Teil der Photonen die Zelle verlässt und in benachbarte Außensegmente eindringt. Dadurch ist die Photorezeptordichte theoretisch auf maximal 1000 000 Photorezeptoren/ mm^2 beschränkt. Dieser Wert wird bei manchen tagaktiven Greifvögeln nahezu erreicht, z. B. beim Keilschwanzadler mit 450 000 Zapfen/ mm^2 in der Fovea und einem Zapfendurchmesser von etwa $1,6 \mu\text{m}$.

Das Auflösungsvermögen wird immer durch den schwächsten Faktor begrenzt. Ein großer Bildpunktstand mit kleinen Beugungsscheibchen nützt nichts, wenn die Photorezeptordichte zu gering ist, um den Helligkeitsabfall zwischen den Bildpunkten zu detektieren. Auch eine hohe Photorezeptordichte nützt nichts, wenn die Beugungsscheibchen zu stark überlappen.

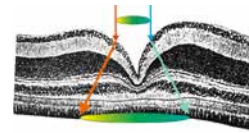
Das Auge von tagaktiven Greifvögeln ist auf maximales Auflösungsvermögen optimiert. Vögel haben ein im Verhältnis zu ihrem Kopf sehr großes Auge (B4). Die Augen eines Vogels nehmen fast den ganzen Kopf ein, während bei Säugetieren



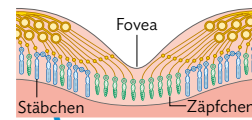
B4 Augengröße bei Mensch und Vogel

A \ Das Auge

nur etwa 5% bis 10% des Schädelvolumens auf die Augen entfallen. Zusätzlich verfügen tagaktive Greifvögel über eine trichterförmige Fovea, die wie eine Zerstreuungslinse wirkt. Durch Unterschiede im Brechungsindex zwischen Retina und Glaskörper und die konkave Krümmung kommt es in der tiefen, steilen Fovea zur Aufweitung der Bildstrahlen und damit zu einer vergrößerten Projektion auf der Photorezeptorschicht am Boden der Fovea (B5). In dem nun vergrößerten Bild ist es leichter, zwischen zwei Bildpunkten drei Photorezeptoren unterzubringen. Tagaktive Greifvögel verfügen mit bis zu 500 000 Zapfen/mm² im Bereich der Fovea über die höchste Zapfendichte im Tierreich. Zum Vergleich: Der Mensch ist das Säugetier mit dem höchsten Auflösungsvermögen. Er verfügt über eine Zapfendichte von 147 000 Zapfen/mm². Im Bereich der Fovea erfolgt eine 1:1-Verschaltung mit den ableitenden Nervenzellen. Zusätzlich erscheint der Bereich der Fovea praktisch frei von Nervenzellen, um einen möglichst ungestörten Lichtweg zu ermöglichen (B6).



B5 | Adlerretina mit trichterförmiger Fovea



B6 | Veränderte Struktur der Netzhaut im Bereich der Fovea

Musteraufgabe

Die Augenlinse des Chamäleons hat die im Tierreich einzigartige Eigenschaft, dass sie im entspannten Zustand Licht nicht bündelt, sondern streut. Ein betrachtetes Objekt wird dadurch ungewöhnlich groß auf der Netzhaut abgebildet. Erläutern Sie den Einfluss dieser Augenlinse auf die Winkelsehschärfe des Chamäleons.

Lösung

Da der Abstand zweier Bildpunkte auf der Netzhaut mindestens dem doppelten Photorezeptorabstand entsprechen muss, damit die Punkte getrennt wahrgenommen werden, können nun Objektpunkte mit einem geringeren Abstand d und damit mit einem geringeren Sehwinkel α noch unterschieden werden. Das bedeutet, dass die Winkelsehschärfe kleiner wird.

Arbeitsaufträge

- 1\ Größere Augen führen bei gleichem Abstand d_{ph} der Photorezeptoren in der Fovea zu einer kleineren Winkelsehschärfe (B2).
 - a) Leiten Sie eine Formel her, die die Abhängigkeit der Winkelsehschärfe α von der Augengröße b und dem Abstand d_{ph} zeigt. Berücksichtigen Sie dabei, dass es sich hierbei um sehr kleine Winkel handelt (Kleinwinkelnäherung).
 - b) Passen Sie die Formel so an, dass sie die Winkelsehschärfe in Winkelminuten angibt.
- 2\ Menschen haben eine Winkelsehschärfe von $0,4'$ (Mäusebussard $0,1'$, Hauskatze $5'$, Wanderratte $40'$). Dabei beträgt der Augendurchmesser beim Menschen im Mittel etwa 2,3 cm (Mäusebussard 2 cm, Hauskatze 1,65 cm, Wanderratte 6,3 mm).
 - a) Schätzen Sie auf dieser Datenbasis mithilfe der Überlegungen von B3 den Abstand der Zapfen für die vier Beispiele ab. Wandeln Sie dies in eine Zapfendichte um.
 - b) Überlegen Sie, wie sich eine trichterförmige Fovea auf die abgeschätzte Zapfendichte auswirkt.
 - c) Vergleichen Sie ihre Ergebnisse aus Teilaufgabe a) bei Mensch, Mäusebussard und Hauskatze mit Literaturwerten (147 000, 450 000 bzw. 27 000 Zapfen/mm²). Beurteilen Sie auf dieser Basis, inwieweit jeweils eine trichterförmige Fovea vorliegen kann.
 - d) Recherchieren Sie, wie die Fovea bei Menschen und Mäusebussarden aussieht.
 - e) Das Verhältnis von Photorezeptoren zu ableitenden Nervenzellen ist ein weiterer wesentlicher Faktor für die Winkelsehschärfe. Katzen haben in ihrer flachen Area centralis (Ort des schärfsten Sehens in der Katzenretina) vier Zapfen pro Nervenzelle. Dies erhöht die Lichtempfindlichkeit. Erklären Sie damit die Abweichung von Literaturwert und geschätztem Wert bei der Zapfendichte der Katze.

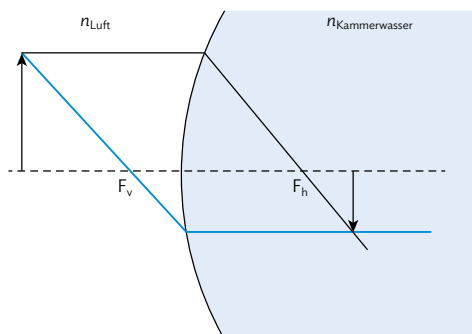
Vermischte Aufgaben

Basisaufgaben

1) Das reduzierte Auge

Das „reduzierte Auge“ ist ein einfaches Modell des dioptrischen Apparates des Auges. Das gesamte optische System wird hier auf eine einzige gekrümmte, lichtbrechende Grenzfläche reduziert, die den Luftraum ($n_{\text{Luft}} = 1$) vom Kammerwasser ($n_{\text{Kammerwasser}} = 1,336$) trennt. Der Krümmungsradius r der Grenzfläche beim entspannten Auge ist 5,7 mm.

Da sich vor und hinter der Grenzfläche Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes befinden, sind die Brennweiten vor und hinter der Grenzfläche unterschiedlich.



Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes als Modell für das Auge

Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$f_v = \frac{n_{\text{Luft}}}{D_{\text{Auge}}} = \frac{n_{\text{Luft}} \cdot r}{n_{\text{Kammerwasser}} - n_{\text{Luft}}}$$

$$f_h = \frac{n_{\text{Kammerwasser}}}{D_{\text{Auge}}} = \frac{n_{\text{Kammerwasser}} \cdot r}{n_{\text{Kammerwasser}} - n_{\text{Luft}}}$$

f_v ist die Brennweite vor der Grenzfläche und f_h die Brennweite hinter der Grenzfläche.

- Berechnen Sie die Brechkraft des Auges in diesem Modell.
- Nennen Sie Maßnahmen, um die Brechkraft des Auges zu maximieren, die sich aus dem Modell ergeben.
- Beurteilen Sie, inwiefern die Maßnahmen aus Teilaufgabe b) in einem realen Auge umgesetzt werden können.

2) Das Gullstrand-Auge

Das Gullstrand-Auge gibt die anatomischen Verhältnisse im Auge besser wieder als das reduzierte Auge. Die Cornea wird als einzelne lichtbrechen-

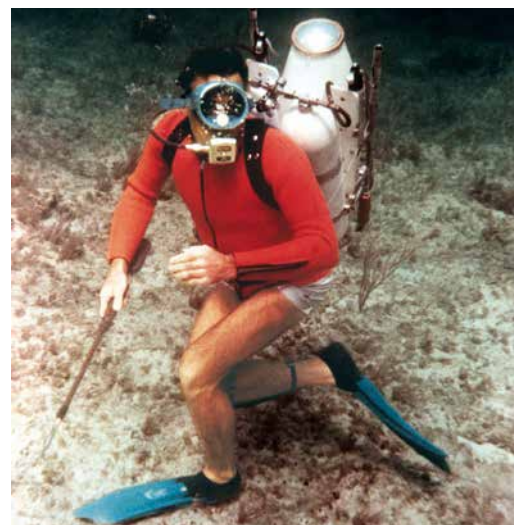
de Fläche mit Krümmungsradius $r = 7,8$ mm modelliert. Zusätzlich wird die Augenlinse als zweite Linse im Abstand $d = 5,73$ mm berücksichtigt. Zunächst werden die Brechkräfte von Cornea und Augenlinse (19,11 dpt) getrennt ermittelt und dann mit der sogenannten Gullstrand-Formel zusammengefasst. Es gilt:

$$D_{\text{Auge}} = D_{\text{Cornea}} + D_{\text{Linse}} - \frac{d}{n_{\text{Kammerwasser}}} \cdot D_{\text{Cornea}} \cdot D_{\text{Linse}}$$

- Berechnen Sie die Brechkraft der Cornea ($n_{\text{Kammerwasser}} = 1,336$).
- Berechnen Sie die Brechkraft des Auges in diesem Modell.
- In Luft wird meist angenommen, dass bei einem System aus zwei Linsen $D_{\text{gesamt}} = D_1 + D_2$ gilt. Nennen Sie die Voraussetzungen dafür, dass dies eine gute Näherung ist.

3) James Bond und die Taucherbrille

Im Film „Feuerball“ wird James Bond in einen Unterwasserkampf verwickelt. In dieser bekannten Szene hat sich beim Filmen ein Fehler eingeschlichen. Beim Unterwasserkampf wird Bonds blaue Taucherbrille von einem seiner Gegner heruntergerissen. Bond nimmt nun seinerseits die schwarze Taucherbrille eines toten Gegners und setzt sich diese unter Wasser ohne große Umstände auf. Dabei verbleibt Wasser in der Taucherbrille. In der nächsten Szene ist die Brille wieder blau.



James Bond 007 im Film „Feuerball“

A \ Das Auge

Diese Szene enthält aber noch eine weit gravierendere Ungereimtheit mit physikalischen Auswirkungen.

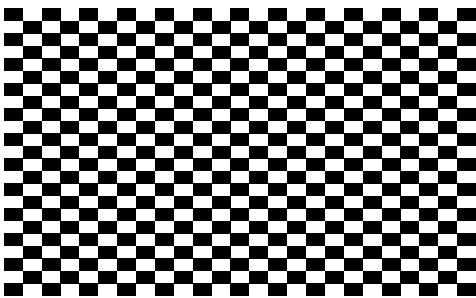
- Erklären Sie, warum eine Taucherbrille unter Wasser scharfes Sehen ermöglicht. Erläutern Sie die physikalischen Grundlagen hierzu.
- Nennen Sie die Sehbeeinträchtigung, der „007“ unterliegt, nachdem ihm seine Taucherbrille abhanden gekommen ist.
- Beim Aufsetzen der schwarzen Taucherbrille beachtet Bond die Regeln der Physik kaum. Erklären Sie, warum die schwarze Taucherbrille nicht von besonders großem Nutzen ist.

4 \ Akkommodation des Auges

Das menschliche Auge passt die Brechkraft der Linse über den Ziliarmuskel an. Doch woher „weiß“ das Auge, dass das Netzhautbild unscharf ist und die Brechkraft angepasst werden muss? Unser Gehirn verwendet mehrere Kriterien, um zu entscheiden, ob das Bild optimal scharf ist: Bildkontrast, Farbsäume, Parallaxe und Augenstellung. Wie diese Kriterien im Einzelnen zusammenspielen, ist allerdings noch nicht völlig verstanden und Gegenstand aktueller Forschung.

a) Bildkontrast

Für das Gehirn ist das Bild am schärfsten, wenn der Kontrast (Helligkeitsunterschied benachbarter Bildpunkte) im Netzhautbild maximal ist. Erklären Sie mithilfe der Abbildung unten, warum dies ein gutes Kriterium für die Bildschärfe ist.



Kontrastmuster

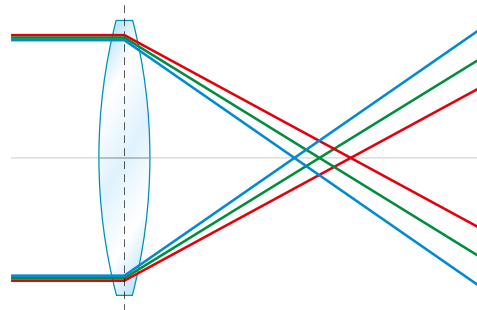
b) Farbsäume

Die Augenlinse weist für blaues Licht eine andere Brennweite auf als für grünes und rotes Licht (chromatische Aberration). Dies führt zu Farbsäumen auf dem Sichtschirm.

Diskutieren Sie, wie sich das Bild eines weißen Rechtecks auf schwarzem Hintergrund auf dem Sichtschirm verändert, wenn der Sichtschirm sich ...

- in der Brennebene des roten Lichts
- in der Brennebene des grünen Lichts
- in der Brennebene des blauen Lichts befindet.

In welchem der drei Fälle ist die Bildschärfe maximal?



Chromatische Aberration

5 \ Auflösungsvermögen

- Erklären Sie kurz den Begriff „Auflösungsvermögen“ und stellen Sie einen physikalischen und biologischen Grund dar, warum dieses beschränkt ist.
- Bei einem guten, gesunden Auge beträgt der Abstand zweier Sehzellen auf der Netzhaut ca. $5 \mu\text{m}$. In welcher Entfernung können zwei voneinander $0,2 \text{ mm}$ entfernte Punkte gerade noch getrennt wahrgenommen werden? Bestimmen Sie den Visus.
- Die Länge eines durchschnittlichen Augapfels beträgt $2,5 \text{ cm}$. Fertigen Sie eine Skizze an, die Ihren Ansatz erklärt.

6 \ Gitter

- Monofrequentes Licht fällt senkrecht auf ein optisches Gitter mit 1000 Spalten pro cm . Das erste Hauptmaximum erscheint gegenüber dem nullten unter einem Winkel von $3,3^\circ$. Welche Wellenlänge hat das benutzte Licht?
- Mit einem optischen Gitter erhält man auf einem $2,4 \text{ m}$ entfernten Schirm bei Na-Licht ($\lambda = 590 \text{ nm}$) die beiden ersten Hauptmaxima in einem Abstand von 14 cm . Berechnen Sie die Gitterkonstante.

Vermischte Aufgaben



Chamäleon beim Beutefang

Zusammenfassende Aufgaben

7\ Das Chamäleonauge

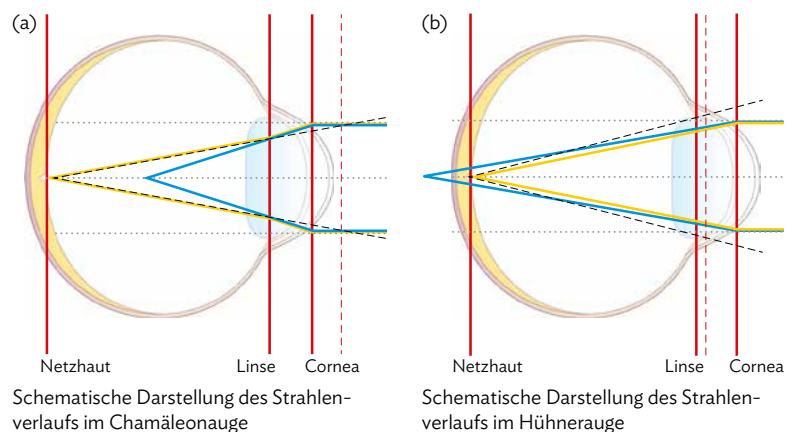
Das Lappenchamäleon schlägt Beutetiere im Abstand von 3 cm bis 25 cm vor der Schnauze durch Herausschnellen seiner Zunge. Doch woher weiß das Chamäleon, wie weit seine Beute entfernt ist? Das Chamäleon fokussiert dazu die Beute. Dafür muss der Ziliarmuskel angespannt werden, um die Linsenkrümmung zu erhöhen. Aus der erforderlichen Muskelanspannung schließt das Chamäleon auf den Abstand.

- Erläutern Sie die beiden grundsätzlichen in Augen vorkommenden Akkommodationsmechanismen und ihre physikalischen Grundlagen.
- Die Entfernung der Netzhaut von der Linse (die Bildweite b) beträgt beim Chamäleonauge etwa 1,0 cm. Wie stark muss sich die Brennweite f bzw. die Brechkraft D ändern, wenn Beute im Abstand von 3 cm bis 25 cm fokussiert werden soll?

Das Chamäleon besitzt eine gekrümmte Cornea, die als Sammellinse wirkt. Die Linse im Augeninneren hat eine variable Brechkraft und dient der Akkommodation. Die Brechkraft der Linse im Chamäleonauge ist erstaunlicherweise negativ. Dies ist einzigartig im Tierreich. Direkte Messungen der Bildgröße auf der Netzhaut des Chamäleons ergaben einen um 15 % höheren Wert als bei einem Hühnerauge mit gleicher Augengröße und üblicher Sammellinsen-Optik.

- Erklären Sie, warum ein vergrößertes Bild auf der Netzhaut zu einer höheren Auflösung führt.
- Der genaue Strahlenverlauf im Linsensystem aus Cornea und Augenlinse ist recht kompliziert. Erklären Sie anhand der Abbildungen unten, wie man die Position einer fiktiven Sammellinse ermitteln kann, die das Linsensystem im Chamäleonauge (Hühnerauge) vereinfachend ersetzen könnte.
- Das Chamäleonauge arbeitet also wie eine einzelne fiktive Sammellinse mit der Brennweite $f_{ges, C}$, die sich deutlich vor der Cornea befindet (Abb. (a)). Dies führt zu einer Bildweite b_C . Das Hühnerauge arbeitet bei gleichen Augenabmessungen wie eine einzelne fiktive Sammellinse mit der Brennweite $f_{ges, H}$, die sich zwischen Cornea und Linse befindet (Abb. (b)). Dies führt zu einer Bildweite b_H . Wie in jedem Auge gilt $b \approx f$. Sofern auf der Netz-

- Position der fiktiven einzelnen Sammellinse
- Strahlenverlauf, den nur die Cornea erzeugen würde
- Strahlenverlauf, der sich ergeben würde, wenn man Cornea und Augenlinse durch eine einzelne fiktive Sammellinse ersetzen würde
- tatsächlicher Strahlenverlauf im Linsensystem



A \ Das Auge

haut ein scharfes Bild entsteht, müssen die Linsengleichungen $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$ bzw. $\frac{B}{G} = \frac{b}{g}$ gelten. Dabei gibt $\frac{B}{G}$ an, wie groß das Bild im Vergleich zum Objekt ist. Erklären Sie damit, warum ein Chamäleonaugen mit Zerstreuungslinse ein größeres Retinabild erzeugt als ein vergleichbar großes Hühnerauge mit Sammellinse.

8 \ Nachtaktive Tiere

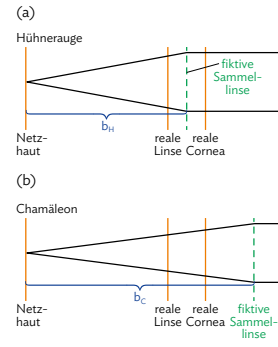
Nachtaktive Tiere (z. B. Eulen, Fledermäuse) haben fast nur Stäbchen. Hier werden auf engstem Raum möglichst viele Stäbchen aneinander gepackt und auf eine Nervenzelle zusammenschaltet, was eine große Empfindlichkeit für schwaches Licht bedeutet. Außerdem gibt es bei vielen nachtaktiven Säugetieren auch lichtreflektierende Kristalle als Lichtreizverstärker im Auge (siehe Abbildung). Lichtquanten, welche nicht absorbiert wurden, werden erneut auf die Rezeptoren zurückgeworfen. Dadurch wird die Intensität verdoppelt.

- a) Recherchieren Sie den Begriff „Tapetum lucidum“.
- b) Fertigen Sie eine detaillierte Skizze zum Katzenauge an, markieren Sie die Unterschiede zum menschlichen Auge und grenzen Sie die Unterschiede ab. Benutzen Sie bei Ihrer Recherche auch englische Suchbegriffe.
- c) Tiefseefische besitzen eine Mehrschichtennetzhaut (siehe Abbildung unten). Beschreiben Sie anhand der Abbildung ihren Aufbau und erklären Sie damit, wie eine Mehrschichtennetzhaut die Lichtausbeute erhöht.
- d) Vergleichen Sie die beiden Strategien zur Erhöhung der Lichtausbeute.

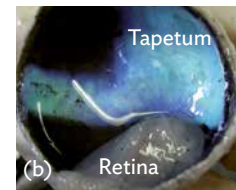
9 \ Pinguinauge

Pinguine müssen an Land und im Meer scharf sehen. Für Felsenpinguine ist es z. B. wichtig, Entfernungen abzuschätzen, damit ihre Sprünge von Felsvorsprung zu Felsvorsprung möglich sind. Sie müssen auch Gefahren unter Wasser erkennen und ihre Nahrung unter Wasser finden. Diese Anforderungen an den Sehsinn der Pinguine brachten verschiedene Anpassungen mit sich.

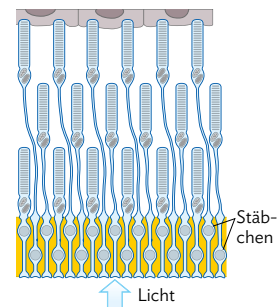
- a) Pinguinaugen haben eine große Akkommodationsbreite von etwa 80 dpt (zum Vergleich: 10 dpt beim erwachsenen Menschen). Erklären Sie anhand der Abbildung ganz unten, warum das Pinguinauge eine wesentlich höhere Akkommodationsbreite aufweist als das menschliche Auge.
- b) Einige Pinguinarten haben eine nahezu ebene Cornea. Welchen Effekt hat dies beim Übergang vom Sehen unter Wasser zum Sehen an Land? Erklären Sie die physikalischen Grundlagen.
- c) Viele Arten, z. B. Humboldt- und Felsenpinguine, weisen eine nicht zu vernachlässigende Corneakrümmung auf. Humboldtpinguine sehen unter Wasser optimal, während Felsenpinguine an Land optimal sehen. Im jeweils anderen Medium treten Beeinträchtigungen des Sehvermögens auf. Erklären Sie kurz, aber genau, welche Beeinträchtigungen bei Humboldt- bzw. Felsenpinguinen jeweils auftreten und worauf sie beruhen.
- d) Die Pupille kann sich bei Kaiserpinguinen stark vergrößern bzw. verengen, um mehr bzw. weniger Licht ins Auge fallen zu lassen. Dies ermöglicht eine Anpassung an stark unterschiedliche Beleuchtungsstärken. Welchen nachteiligen Effekt hat dies bei geringer Beleuchtungsstärke? Erläutern Sie dies anhand einer Skizze.



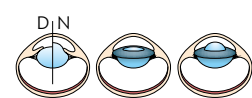
Zu 7e): Strahlenverlauf, wenn man Cornea und Augenlinse durch eine einzelne fiktive Sammellinse ersetzt



Zu 8: Steigerung der Lichtausbeute durch lichtreflektierende Kristalle (Tapetum lucidum)
(a) leuchtende Katzenaugen
(b) Tapetum beim Kalbsauge



Zu 8c): Mehrschichtennetzhaut



Schematischer Aufbau eines Pinguinauges

Selbsttest: Überprüfen Sie Ihre Kenntnisse und Kompetenzen



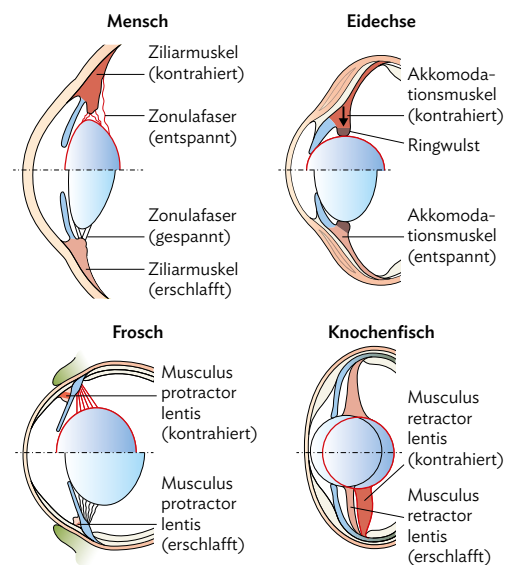
Selbsttest-Checkliste

- ✓ Bearbeiten Sie die Aufgaben schriftlich in ordentlicher Form. Die Auswertungstabelle zeigt die Kompetenzerwartungen und Hilfestellungen.
- ✓ Vergleichen Sie Ihre Lösungen mit den Lösungsskizzen unter [MC 67055-06](#)
- ✓ Bewerten Sie Ihre Lösungen selbst mit den Symbolen 😊, 😐 oder 😞.



- 1 Landlebende Säugetiere, Fische und Amphibien haben sehr unterschiedliche Lebensbedingungen. Dies zeigt sich auch an ihren Augen.

- a) Es gibt zwei Akkommodationsmechanismen. Erläutern Sie deren physikalische Grundlagen und ordnen Sie anhand der Abbildung Knochenfische, Frösche, Menschen und Eidechsen den entsprechenden Akkommodationsmechanismus zu. Stellen Sie einen Zusammenhang zu den Lebensbedingungen der Lebewesen her.



Unterschiedliche Akkommodationsmechanismen

- b) Bei Fröschen wird die Linse im Falle der aktiven Akkommodation durch den musculus protractor lentis nach vorne, bei Knochenfischen durch den musculus retractor lentis nach hinten geschoben. Kontrahiert der entsprechende Muskel, ist dies für das Auge anstrengend. Entscheiden Sie mithilfe der Linsengleichung, ob Frösche bzw. Knochenfische eine entspannte Fern- oder eine entspannte Nahsicht haben.

- c) Das menschliche Auge sieht entspannt in die Ferne. Beschreiben Sie die anatomischen Abläufe während der Akkommodation. Erklären Sie damit, warum es beim Menschen Altersweitsichtigkeit, aber keine Alterskurzsichtigkeit gibt.

- 2 Das Hundeauge hat eine Akkommodationsbreite von etwa 3 dpt, das Menschenauge von etwa 10 dpt und das Mäusebussardauge von etwa 40 dpt. Dabei sind die Augen dieser Lebewesen in etwa gleich groß: Mensch 24,5 mm, großer Hund 21,9 mm und Mäusebussard 23 mm.

- a) Bei Fernakkommodation ist das Auge entspannt. Lichtstrahlen von weit entfernten Objekten sind nahezu parallel und werden im Auge auf die Netzhaut fokussiert. Nehmen Sie vereinfachend an, dass $b \approx f$ gilt. Berechnen Sie damit jeweils die Brechkraft von Menschenauge, Hundeauge und Mäusebussardauge.
- b) Berechnen Sie anhand der Akkommodationsbreite nun jeweils die Brechkraft im akkommodierten Auge und schätzen Sie mithilfe der Linsengleichung daraus ab, wo sich jeweils der Nahpunkt des Auges befindet.

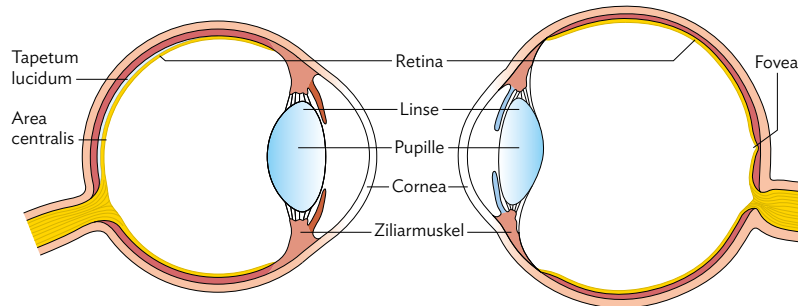
A \ Das Auge

- 3 Das menschliche Auge weist einen Sehschärfewinkel von $\alpha = 0,4'$ auf, das Hundeauge je nach Quelle einen Wert von $\alpha = 5'$ bis $\alpha = 8'$.

a) Definieren Sie den Begriff „Sehschärfewinkel“.

b) Erklären Sie anhand der Abbildung, warum das Auflösungsvermögen des Hundeauges schlechter ist als das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges.

c) In der Area centralis (Ort des schärfsten Sehens) des Hundeauges läuft die Information von vier Zapfen in einer Nervenzelle zusammen. Erklären Sie, wie sich das auf das Auflösungsvermögen des Hundeauges auswirkt.

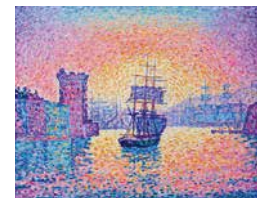


Hundeauge (links) und menschliches Auge (rechts) im Vergleich

- 4 a) Rotes Licht ($\lambda_{\text{rot}} = 633 \text{ nm}$) trifft senkrecht auf einen Doppelspalt. Im Abstand von 2,0 m steht parallel zur Spaltebene ein ebener Schirm. Die beiden Maxima erster Ordnung haben den Abstand 5,2 cm. Berechnen Sie den Spaltabstand.
 b) Nun wird der Doppelspalt mit blauem ($\lambda_{\text{blau}} = 436 \text{ nm}$) statt rotem Licht bestrahlt. Berechnen Sie nun den Abstand der beiden Maxima erster Ordnung.
 c) Begründen Sie mit den Ergebnissen aus den Teilaufgaben a) und b), dass blaues Licht theoretisch eine höhere Auflösung als rotes Licht ermöglicht. Erläutern Sie, warum dies in einem realen Auge praktisch keine Rolle spielt.

- 5 Ein pointillistisches Bild besteht aus kleinen Farbtupfern. Ist der Betrachter weit genug entfernt, überlappen die Beugungsscheibchen im Auge. Durch additive Farbmischung entstehen dabei homogene farbige Flächen.

- a) Ein Farbpunkt habe einen Durchmesser von 3,0 mm. Berechnen Sie, wie weit man vom Bild zurücktreten müsste, um den oben beschriebenen Effekt zu beobachten. Gehen Sie von grünem Licht ($\lambda = 550 \text{ nm}$) und einem Pupillendurchmesser von 5,0 mm aus. Die Länge des Auges beträgt etwa 24,5 mm.
 b) Beschreiben Sie, welche zwei grundsätzlichen Möglichkeiten es gibt, in einem pointillistischen Bild einen gelben Gesamtfarbeindruck zu erzeugen.



Pointillistisches Gemälde von Paul Signac

Auswertungstabelle

Ich kann ...	Hilfe
1 mit der Linsengleichung quantitative Überlegungen zum scharfen Sehen durchführen.	S. 18/19
2 die Akkommodationsmechanismen und ihre physikalischen Grundlagen erläutern.	S. 22–25
3 die additive Farbmischung als physiologischen Effekt erklären.	S. 34–36
4 quantitative Überlegungen zu Doppel- und Einzelspalt durchführen.	S. 42–45
5 den Einfluss verschiedener Faktoren auf das Auflösungsvermögen des Linsen Auges quantitativ beschreiben.	S. 52/53
6 die Passung verschiedener Augentypen im Hinblick auf ihre jeweiligen Umwelтанforderungen untersuchen.	S. 24/25 S. 52/53

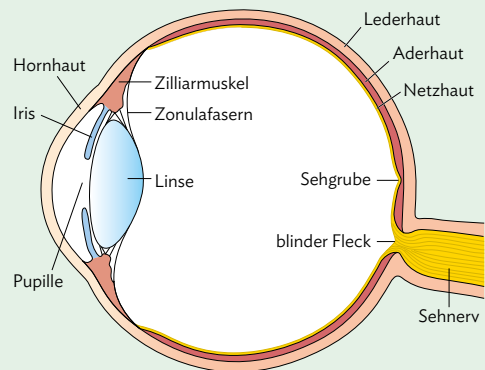
Zusammenfassung

Aufbau des menschlichen Auges

Als dioptrischen Apparat eines Linsen Auges bezeichnet man ...

- die lichtbrechenden Flächen der Hornhaut (Cornea) und der Linse
- den Glaskörper
- die Pupillenöffnung.

Das Linsenauge lässt sich mithilfe eines einfachen Linse-Schirm-Modells aus Objekt, Linse und Sichtschirm beschreiben. Bei Bedarf kann dieses sehr einfache Modell durch Einfügen einer Lochblende oder weiterer Linsen zu einem erweiterten Linse-Schirm-Modell ergänzt werden.



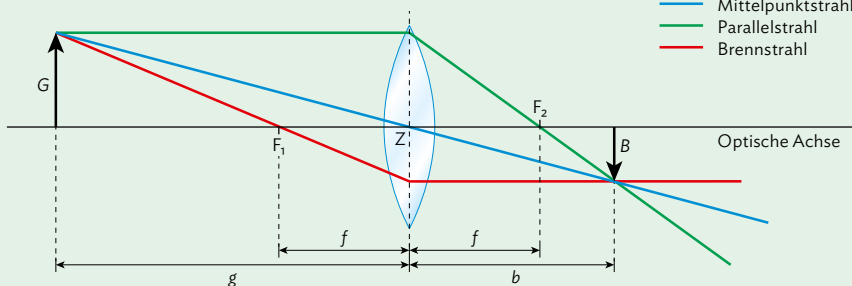
Vereinfachter Aufbau des menschlichen Auges

Abbildung auf der Netzhaut

Zur Konstruktion des Bildes verwendet man in der geometrischen Optik häufig stellvertretend für das gesamte Strahlenbündel die drei Hauptstrahlen: Mittelpunktstrahl, Parallelstrahl und Brennstrahl.

Daraus lassen sich die beiden Linsengleichungen ableiten:

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} \quad \text{und} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

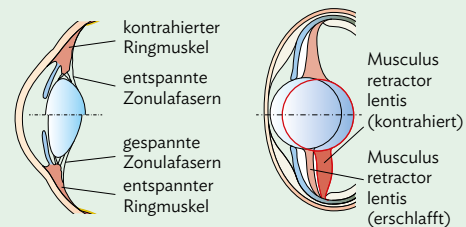


Konstruktion des Bildes über die Hauptstrahlen. Bezeichnungen: G : Gegenstandsgröße, B : Bildgröße, F_1, F_2 : Brennpunkte, f : Brennweite, g : Gegenstandsweite, b : Bildweite

Die Anpassung des Auges an unterschiedliche Gegenstandsweiten g nennt man Akkommodation.

Die Brechkraft und Position der Cornea ist nicht variabel. Um Gegenstände in verschiedenen Entfernungen zum Auge scharf abbilden zu können, übernimmt die Linse die Aufgabe der Akkommodation. Aus der Linsengleichung ergeben sich dafür zwei Möglichkeiten:

- Anpassung der Brennweite f bei fester Bildweite b durch Veränderung der Linsenkrümmung
- Anpassung der Bildweite b bei fester Brennweite f durch Verschiebung der Linse.



Akkommodation durch Linsenkrümmung im menschlichen Auge

Akkommodation durch Verschiebung der Linse im Froschauge

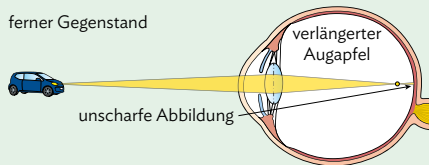
Die fokussierende Wirkung einer Linse wird in der Physik über die Brennweite f beschrieben. Augenärzte und Optiker verwenden die Brechkraft D statt der Brennweite, um Linsen zu beschreiben.

$$\text{Brechkraft} = \frac{1}{\text{Brennweite}} \Rightarrow D = \frac{1}{f}$$

$$\text{Einheit } [D] = 1 \text{ Dioptrie} = 1 \text{ dpt} = 1 \frac{1}{\text{m}}$$

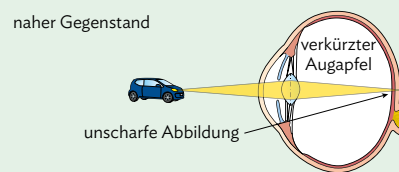
Fehlsichtigkeiten

Kurzsichtige Menschen haben ein zu lang gebautes Auge. Die Brechkraft des dioptrischen Apparates ist zu hoch im Verhältnis zur Länge des Auges. Daher entsteht ein scharfes Bild vor der Netzhaut. Bei fernen Gegenständen ist dies besonders ausgeprägt.



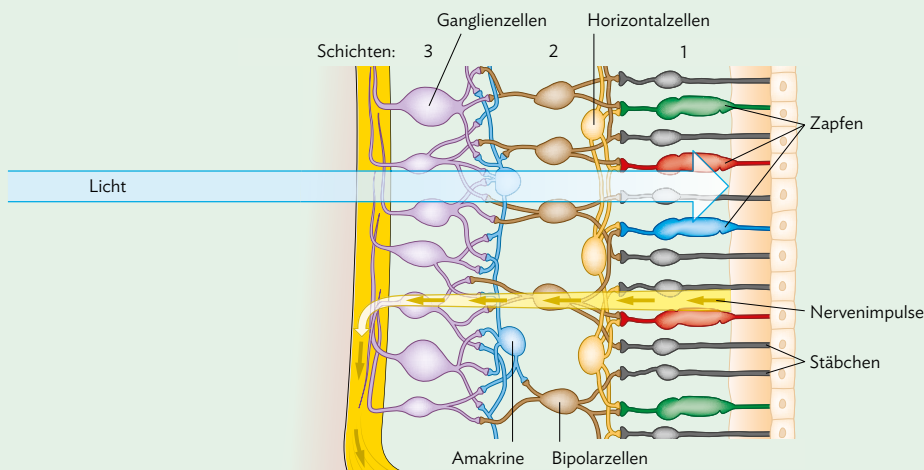
Kurzsichtiges Auge

Weitsichtige Menschen haben ein zu kurz gebautes Auge. Die Brechkraft des dioptrischen Apparates ist zu schwach im Verhältnis zur Länge des Auges. Daher entsteht ein scharfes Bild hinter der Netzhaut. Bei nahen Gegenständen ist dies besonders ausgeprägt.



Weitsichtiges Auge

Aufbau der Netzhaut

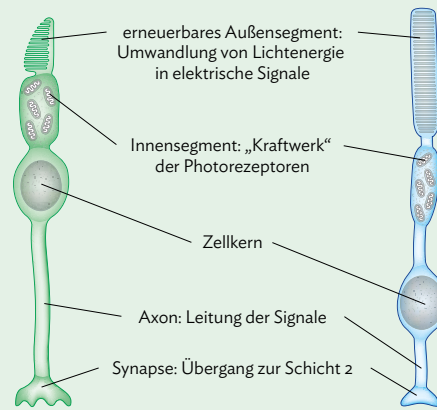


Die drei Schichten der Netzhaut: 1 Photorezeptoren, 2 Horizontale Zellen, Bipolarzellen und amakrine Zellen, 3 Ganglienzellen

Zusammenfassung

Es gibt zwei Arten von Photorezeptoren:

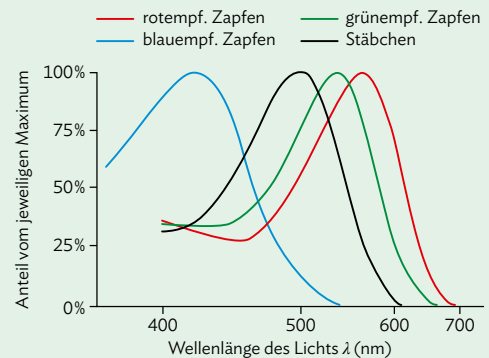
- Die Zapfen gibt es in drei verschiedenen Unterarten (rot-, grün-, blauempfindlich). Sie sind für das Sehen bei Tageslicht und für das Farbsehen zuständig.
- Die Stäbchen sind für das Dämmerungssehen und das Schwarz-Weiß-Sehen zuständig.



Aufbau Zapfen (rechts) und Stäbchen (links)

Farbsehen

Die Wahrnehmung von Farben ist für uns Menschen möglich, da wir drei unterschiedlich empfindliche Zapfenarten haben, die mit verschiedenen Sehfärbstoffen besetzt sind. Licht, das auf diese Sehfärbstoffe trifft, wird dabei in Abhängigkeit von der Wellenlänge der einzelnen Zapfen unterschiedlich häufig absorbiert und damit in verschieden starke Signale umgewandelt.

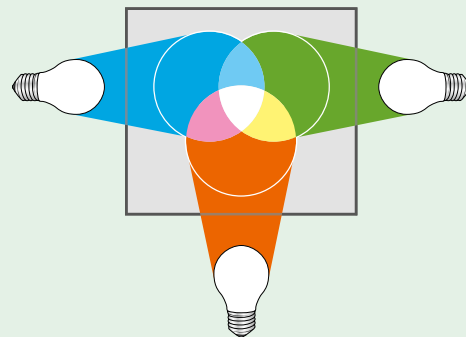


Absorptionsspektren der Photorezeptoren

Additive Farbmischung:

- Wird Licht der drei Primärfarben Rot, Grün und Blau mit gleicher Helligkeit gemischt, so entsteht auf der Netzhaut der Farbeindruck Weiß.
- Wird Licht aus zwei der drei Primärfarben gemischt, ergibt sich:
 - Rot + Blau = Magenta
 - Rot + Grün = Gelb
 - Grün + Blau = Cyan

Subtraktive Farbmischung entsteht, wenn aus dem auftreffenden Licht durch Pigmente ein Farbanteil absorbiert wird und das restliche reflektierte Licht ins Auge trifft.



Additive Farbmischung

Interferenz am Doppel- und Einfachspalt

Doppelspalt:

Interferenzmaxima k -ter Ordnung:

$$\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{b} = \frac{d_k}{a} \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

Interferenzminima k -ter Ordnung:

$$\sin \alpha_k = \frac{(2k-1) \cdot \lambda}{2 \cdot b} \approx \frac{d_k}{a} \quad (k = 1, 2, \dots)$$

Einfachspalt:

Interferenzmaxima k -ter Ordnung:

$$\sin \alpha_k = \frac{(2k+1) \cdot \lambda}{2B} \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

Interferenzminima k -ter Ordnung:

$$\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{B} \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$$

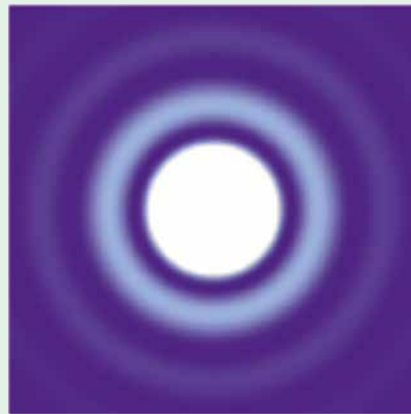
Interferenz an der Lochblende

Minima an der Lochblende:

1. Ordnung: $\Delta s = B \cdot \sin \alpha = 1,22 \cdot \lambda$

2. Ordnung: $\Delta s = B \cdot \sin \alpha = 2,23 \cdot \lambda$

3. Ordnung: $\Delta s = B \cdot \sin \alpha = 3,24 \cdot \lambda$



Beugungsbild einer kreisförmigen Öffnung

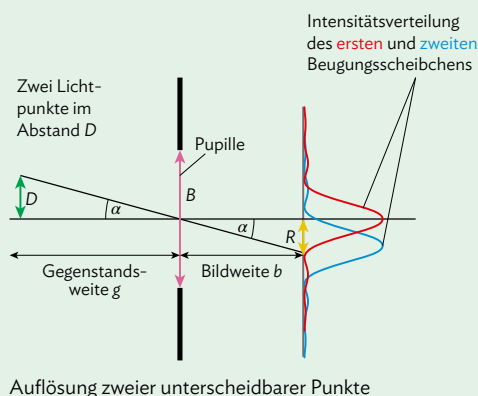
Rayleigh-Kriterium

Der Strahlensatz liefert für den Abstand d zweier Hauptmaxima auf der Netzhaut:

$$\frac{D}{g} = \frac{d}{b}$$

Zwei Beugungsscheibchen sind nur dann noch zu unterscheiden, wenn ihre Hauptmaxima mindestens um ihren Radius R voneinander entfernt sind. Man spricht hierbei vom Rayleigh-Kriterium: $d \geq R$. Mithilfe der Kleinwinkelnäherung und der Interferenz an der Lochblende kann man folgern:

$$R = \frac{1,22 \cdot \lambda \cdot b}{B}$$





click & study

Digitale Ausgabe des Schülerbands



Mit der digitalen Ausgabe des Schülerbands click & study und dem digitalen Lehrermaterial click & teach wird die Unterrichtsgestaltung und Vorbereitung einfacher als je zuvor.

Einfach in der Navigation:

Im Mittelpunkt steht immer die digitale Ausgabe des Schülerbands, um die sich alle Zusatzmaterialien und Funktionen gruppieren. So finden sich alle Inhalte dort, wo sie benötigt werden.

Einfach in der Bedienung:

click & study und click & teach bieten eine Fülle an nützlichen Funktionen. Die Gestaltung und die Bedienelemente sind dennoch nicht überladen und bleiben selbsterklärend.

Einfach im Zugriff:

Mit einem Internetbrowser können Sie mit jedem Endgerät auf click & study und click & teach zugreifen. Alternativ nutzen Sie die kostenfreie App – so können Sie auch offline arbeiten. click & study kann zudem via www.bildungslogin.de verwendet werden.

Einfach für alle:

click & study und click & teach können miteinander verknüpft werden. So funktioniert der Unterricht bei Bedarf komplett digital – ideal für Tablet-Klassen und den digitalen Materialaustausch zwischen Lehrenden und Lernenden.

Weitere Informationen, kostenfreie Demoversionen und Erklärvideos finden Sie auf www.click-and-study.de und www.click-and-teach.de

click & teach

Digitales Lehrermaterial



Das und vieles mehr bieten click & study und click & teach:



Digitale Arbeitsseiten

Durch das Einfügen digitaler Arbeitsseiten besteht die Möglichkeit, auf einer zusätzlichen leeren Seite eigene Texte, Bilder, Links und Freihandzeichnungen zu hinterlegen.



Umfangreiches Lehrermaterial (nur in click & teach)

click & teach bietet umfangreiches digitales Zusatzmaterial wie zum Beispiel Lösungen, didaktische Hinweise, weitere digitale Lernanwendungen, Animationen, Arbeitsblätter, Kopiervorlagen, Tafelbilder und vieles mehr.



Lerngruppenfunktionen

Als Lehrkraft haben Sie in click & teach die Möglichkeit, Materialien in click & study freizuschalten. Im Aufgabenpool und im Forum können Lernende Aufgaben digital empfangen, wieder abgeben und sich austauschen.




Lizenzmodelle für jeden Bedarf

Egal ob nur für Sie, das Kollegium oder die ganze Schule – wir haben für jeden Bedarf ein passendes Angebot. Bestellen können Sie ausschließlich auf www.ccbuchner.de.

Lizenzmodelle click & teach

In click & teach sind immer die vollständige digitale Ausgabe des C.C.Buchner-Lehrwerks und umfangreiches Lehrermaterial enthalten. Die Laufzeit jeder click & teach-Lizenz gilt, solange das C.C.Buchner-Lehrwerk als gedrucktes Schulbuch lieferbar ist, in der Regel sind das mehrere Jahre. Inhaltlich sind alle Lizenzformen identisch.

	Einzellizenz	Einzellizenz Box	Einzellizenz flex	Kollegiums- lizenz
Lizenz- anzahl	1	1	1	beliebig viele Lizenzen für Ihr Fachkollegium (inkl. Referendare)
Weitergabe	nicht übertragbar	nicht übertragbar	übertragbar*	für das komplette Fachkollegium (inkl. Referendare)
Zugang	digitaler Freischaltcode per E-Mail	Box inkl. Karte mit Freischaltcode per Post	direkte Freischaltung im Schulkonto	direkte Freischaltung im Schulkonto
Verfüg- barkeit	im persönlichen Nutzerkonto	im persönlichen Nutzerkonto	im verknüpften Schulkonto	im verknüpften Schulkonto

*Die Einzellizenz flex kann beliebig oft an eine andere Person übertragen werden.

Schulkonto

Auf www.ccbuchner.de können sich Lehrkräfte (auch jene im Referendariat) mit ihrem Schulkonto verknüpfen und folgende Funktionen nutzen:

► **click & teach-Lizenzen erwerben und nachkaufen**

In wenigen Schritten können über die Auswahl des Fachs und des Bundeslands die Kollegiumslizenz sowie die Einzellizenzen flex per Rechnung an die hinterlegte Schule erworben werden. So kann click & teach direkt genutzt werden – ohne Wartezeit!

► **click & teach-Lizenzen verwalten und übertragen**

Daneben kann die Zuordnung der Lizenzen zu Mitgliedern des Fachkollegiums eingesehen und verwaltet werden. Fachfremden Lehrkräften kann ebenfalls manuell eine Lizenz zugewiesen werden. Wurde eine Einzellizenz flex erworben, erfolgt im Schulkonto die Zuordnung bzw. die Übertragung.

► **Zugriffsrechte verwalten**

Im Schulkonto können für alle verknüpften Kolleginnen und Kollegen die Rechte (*Lizenzen kaufen, Lizenzen verwalten, Zugriffsrechte bearbeiten, Schuldaten bearbeiten und Schulkollegium verwalten*) individuell vergeben werden.

Lizenzmodelle click & study

Auch in click & study ist immer die vollständige digitale Ausgabe des C.C.Buchner-Lehrwerks enthalten. Die Schülerinnen und Schüler erhalten Zugang zur digitalen Ausgabe über einen Freischaltcode, der per E-Mail an sie verschickt wird. Verfügbar ist click & study dann im persönlichen Nutzerkonto der Schülerinnen und Schüler. Die Lizenzen sind nicht übertragbar.

click & study	Einzellizenz	Einzellizenz Print Plus
Preis	Normalpreis	Wenn das gedruckte Schulbuch eingeführt ist, ist pro Buch eine Jahreslizenz ab 1,90 € erhältlich.
Laufzeit	12 + 1 Monat ab Freischaltung	12 + 1 Monat ab Freischaltung
Lizenzanzahl	1	1 pro eingeführtem Schulbuch

Stand: 01.01.2024

Sie haben Fragen?

Unsere Kolleginnen und Kollegen in der Digital-Beratung helfen Ihnen gern.

E-Mail: click-and-teach@ccbuchner.de | click-and-study@ccbuchner.de

Telefon: +49 951 16098333 | Mo, Mi, Fr: 10:00 – 11:30 Uhr | Di, Do: 14:00 – 15:30 Uhr

Weitere Informationen:

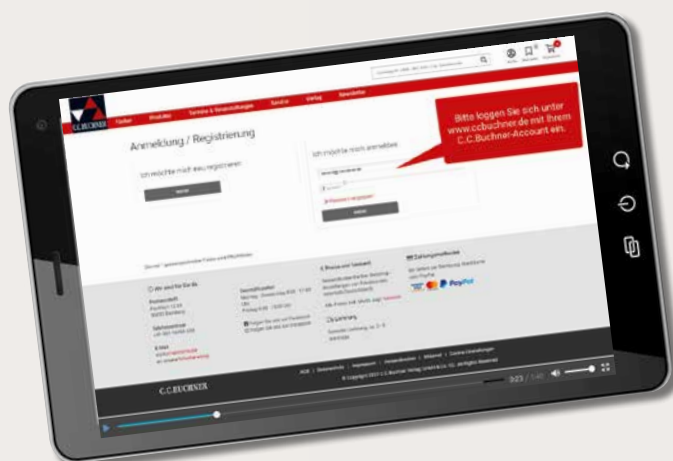
www.click-and-study.de

www.click-and-teach.de

www.ccbuchner.de/schulkonto



Erklärvideos
Schulkonto



Physik – Gymnasium Bayern Sek II

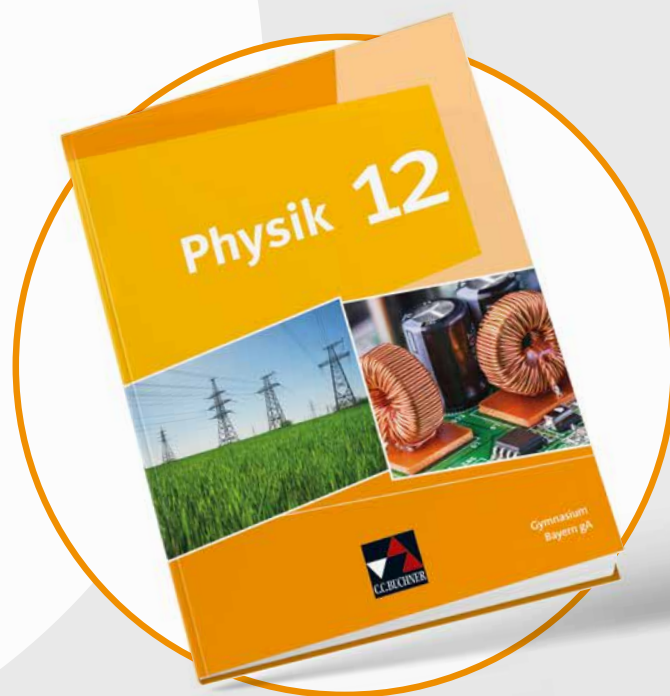
Physik 12

gA

Unser Lehrwerk **Physik 12** für die Oberstufe eignet sich optimal für den regulären Physikunterricht an bayerischen Gymnasien. Mit progressiv aufeinander aufbauenden Fachmethoden sowie speziellen, abiturähnlichen Aufgaben legt Band 12 den Grundstein für die Abiturvorbereitung.



Mehr Infos:
www.ccbuchner.de/bn/67052



Das macht „Physik 12“ so besonders:

- ▶ übersichtliche Seitenstruktur
- ▶ umfangreiche Zusatzmaterialien als Mediacodes direkt im Buch
- ▶ innovatives Konzept zum eigenverantwortlichen Arbeiten
- ▶ Aufgaben zur Abiturvorbereitung
- ▶ integrierte Materialien und Arbeitsblätter zur Vertiefung – auch für das erhöhte Anforderungsniveau

Digitale Lernumgebungen

Der Lehrplan erfordert an verschiedenen Stellen die Verwendung digitaler Lernumgebungen (z. B. zur Relativitätstheorie). Sie können hierzu passende Inhalte über im Buch abgedruckte Mediacodes mühelos in den Unterricht einbinden. Dank der automatischen Auswertung der Übungen erhalten Ihre Schülerinnen und Schüler ein direktes Feedback und bei Bedarf weitere Hilfestellungen!

Innovatives EVA-Konzept

Das eigenverantwortliche Arbeiten stellt eine große Herausforderung dar, weshalb wir Sie dabei bestmöglich unterstützen möchten: Die entsprechenden Buchkapitel sind mit zahlreichen Fachmethoden und zielgerichteten Arbeitsaufträgen so konzipiert, dass Ihre Schülerinnen und Schüler vollkommen eigenständig die notwendigen Kompetenzen erarbeiten können.

digitales Zusatzmaterial auch via QR- oder Mediacodes direkt in der Print-Ausgabe verfügbar



Ideal für den digitalen Materialaustausch

Die **digitale Ausgabe des Schülerbands click & study** und das **digitale Lehrmaterial click & teach** bilden zusammen die ideale digitale Lernumgebung: vielfältig im Angebot und einfach in der Bedienung!

Mehr Infos finden Sie auf den Seiten 38 bis 45 und auf www.click-and-study.de und www.click-and-teach.de.



Erklärvideos **click & study** und **click & teach**

**Physik 13 (gA)
 und Astrophysik
 neu sind
 bereits in
 Vorbereitung.**

Unsere WebSeminare für Bayern

Wir unterstützen und begleiten Sie beim Umsetzen aktueller Lehrpläne – und das nicht nur mit unseren neuen Lehrwerken. Wir möchten Ihnen Anregungen bieten, Materialien vorstellen und Gelegenheit zum Gedankenaustausch geben.

Deshalb bieten wir Ihnen WebSeminare an, für die Sie auch eine Teilnahmebestätigung erhalten.

Natürlich finden Sie uns ebenfalls auf überregionalen Messen und Kongressen.



Detaillierte Informationen und Termine finden Sie auf www.ccbuchner.de/veranstaltungen.

Wir freuen uns auf spannende Veranstaltungen, auf gute Gespräche und vor allem auf Sie!



Nichts mehr verpassen:
Unser Newsletter
mit allen aktuellen Terminen

Abonnieren Sie jetzt unseren Veranstaltungsnewsletter!
Damit sind Sie fächerübergreifend immer über die aktuellen Termine von C.C.Buchner informiert und können sich Ihren Platz sichern.

Sie wünschen persönliche Beratung?
Unser Schulberatungsteam für Bayern ist für Sie da
– vor Ort, telefonisch und online:



Dr. Katrin Brogl

Mobil: 0178 6012379

E-Mail: k.brogl@ccbuchner.de



Annette Goldscheider

Telefon: 0821 2593648

Mobil: 0171 6012371

E-Mail: goldscheider@ccbuchner.de



Kilian Jacob

Mobil: 0171 6012375

E-Mail: jacob@ccbuchner.de

Sie benötigen weitere Exemplare
dieser Leseprobe* für Ihre Fachkonferenz?

1

Geben Sie auf www.ccbuchner.de die
Bestellnummer **L67055** in die Suchleiste ein.



2

Legen Sie die kostenfreie Leseprobe
(1 Exemplar pro Person) und ggf. weitere
Produkte in Ihren **Warenkorb**.



3

Folgen Sie den weiteren Anweisungen, um
den Bestellvorgang abzuschließen.

*Nur solange der Vorrat reicht.

Oder
direkt über:



L67055

