

1 Licht und Sehen

Inzwischen war es mächtig heiß geworden, und Herrn Sommer kamen Zweifel, ob Anne und ihre Freunde nicht vielleicht doch lieber baden gehen wollten, als sich mit ihm über Physik zu unterhalten. Aber als er Anne im Treppenhaus begegnete und sie daraufhin ansprach, zerstreute sie seine Bedenken. »Wir können uns ja morgens schon ganz früh bei Ihnen treffen, da ist es noch nicht so heiß«, schlug sie vor. »Julia und ich sind sowieso Frühaufsteher, von Felix weiß ich es nicht – und Niki, den schmeiß ich einfach aus dem Bett, der würde sonst sicher bis Mittag pennen.«

»Gut, so könnten wir es machen«, meinte Herr Sommer. »Mein Arbeitszimmer liegt nach Westen, da ist es morgens noch ziemlich kühl.«

Eine halbe Stunde nach der abgemachten Zeit kamen die vier schließlich in der Wohnung der Sommers an. »Niki hat natürlich verschlafen«, entschuldigte Anne die Verspätung. »Also das ist mein Vetter Niki – und das ist Herr Sommer.«

»Hallo Niki!«, begrüßte ihn Herr Sommer freundlich, »Von Anne weiß ich, dass du schon Physik in der Schule hast, zwei Jahre schon, nicht? Aber es wird auch für dich nicht langweilig werden.«

»Da hab ich keine Sorge«, meinte Niki. »Sie sollen es ja ganz spannend machen, hat mir Anne erzählt. Und wenn ich das schon kenne, was Sie den anderen erklären wollen, dann halt ich mich vornehm zurück!«

»Du bist mir vielleicht ein Angeber!«, rief Anne empört. »Zeig doch erst einmal, was du gelernt hast, bevor du solche Töne spuckst!«

»Nun, wir werden ja sehen«, sagte Herr Sommer schnell. »Lasst uns gleich in mein Arbeitszimmer gehen. Ich habe es die ganze Nacht gelüftet und es ist noch angenehm kühl.«

Herrn Sommers Arbeitszimmer war recht spartanisch eingerichtet. Das auffallendste Möbelstück war ein großer, alter Tisch mit einer Massivholzplatte. Links daneben stand auf einem kleineren Tisch ein Computer mit Bildschirm, Tastatur und Drucker. An einer der Wände des Zimmers war ein deckenhohes Bücherregal angebracht, in dem neben Massen von Büchern und Zeitschriften allerlei Gerätschaften bereitlagen.

An der dem Regal gegenüberliegenden Wand hingen ein schlichtes Thermometer und eine große, weiße Wandtafel, auf die man nicht mit Kreide, sondern mit einem speziellen Filzstift schreiben konnte. Die dem Fenster gegenüberliegende Wand war bis auf ein Waschbecken mit einem Spiegel darüber vollkommen kahl. Offensichtlich hatten dort früher einige Bilder gehangen, wie man aus einigen Nägeln und Staubkanten schließen konnte. Jetzt war ein etwa handgroßes Mosaik aus Achatplatten und einem Rand aus geschliffenem Glas, das vor der Fensterscheibe baumelte, der einzige Schmuck im Zimmer. Dann gab es noch ein paar Stühle um den Tisch herum. Das war alles.

Herr Sommer nahm einen der Stifte, die auf einer schmalen Ablage am unteren Rand der Tafel lagen, und schrieb mit großer Schrift quer über die ganze Tafelfläche:



»Ich ahne schon, was Sie mit uns vorhaben«, sagte Anne. »Sicher veraten Sie uns jetzt diesen Trick mit der Münze, den Sie an meinem Geburtstag vorgeführt haben. Hab ich Recht?«

»Ja, darum wird es auch gehen«, antwortete Herr Sommer. »Aber ich habe gedacht, wir fangen mit etwas Einfacherem ...«

»Ach so, Niki«, wurde er von Anne unterbrochen. »Du warst da ja gar nicht dabei. Also, da ging es darum, dass man ein Geldstück auf dem Boden einer Schüssel erst sehen konnte, wenn die Schüssel mit Wasser gefüllt wurde ...«

»Kenn ich«, schnitt ihr Niki das Wort ab, »den Versuch haben wir auch gemacht. Das liegt an der Lichtbrechung.«

»An was?«

»Lichtbrechung«, wiederholte Niki herablassend. »So heißt das, weil das Licht am Wasser gebrochen wird.«

»Welches Licht denn?«, hakte Anne nach.

»Na, eben Licht. Alles Licht wird am Wasser gebrochen und natürlich auch an Glas.«

»Du glaubst doch nicht im Ernst«, sagte Anne leicht gereizt, »dass das so zu verstehen ist!«

»Was heißt hier verstehen?«, verteidigte sich Niki. »Das sind Tatsachen. Wenn du eine Münze ins Wasser legst, dann bleibt die nicht dort, wo du sie hingelegt hast, sondern rutscht nach oben, eben wegen der Lichtbrechung. Du kannst ja Herrn Sommer fragen, wenn du mir nicht glaubst.«

»Die Münze bleibt doch aber auf dem Boden der Schüssel liegen, Niki«, wandte Anne ein.

»Kann sein, dass sie nicht wirklich hochrutscht, sondern dass es nur so aussieht, als ob. Das ist eben so eine Art optische Täuschung, verstehst du. Und schuld daran ist die Lichtbrechung.«

»Du solltest dich nicht nur vornehm zurückhalten, wenn du etwas schon weißt, sondern auch, wenn du etwas nicht ganz richtig weißt.«

»Nun ja«, schaltete sich Herr Sommer ein, »mit der Lichtbrechung hat das tatsächlich etwas zu tun. Aber so weit sind wir noch nicht.«

Augenfälliges – Bedingungen für das Sehen

Ohne weiteren Kommentar nahm Herr Sommer eine Taschenlampe vom Bücherregal, knipste sie an und legte sie so auf ein brusthohes Regalbrett, dass ihr Schein die im rechten Winkel zum Regal verlaufende weiße Wand traf. Auf der weißen Tapete konnte man einen hell erleuchteten, an den Rändern etwas verschwommenen Lichtfleck sehen. Dann schwenkte er die Taschenlampe langsam und der Lichtfleck wanderte auf der Tapete weiter in Richtung auf den Spiegel zu. Als ihr Licht auf den Spiegel traf, war auf diesem kein Lichtfleck mehr zu sehen. Dem Spiegel war überhaupt nicht anzumerken, dass er vom Schein der Taschenlampe getroffen wurde. Aber der Lichtfleck tauchte jetzt auf der dem Regal gegenüberliegenden Wand auf.

Herr Sommer schaute seine Gäste fragend an, aber niemand wollte etwas dazu sagen. »Nun, ich habe nicht erwartet, dass euch dieser einfache Versuch besonders beeindruckt. Ihr habt natürlich auch vorher schon gewusst, dass es einen Lichtfleck gibt, wenn man mit einer Taschenlampe auf eine Wand leuchtet, und wahrscheinlich auch, dass ein Spiegel das Licht umlenkt. Interessant wird es erst, wenn man versucht, diese Beobachtungen zu deuten. Warum sehen wir z. B. den Lichtfleck auf der Wand, aber nicht auf dem Spiegel?«

»Vielleicht ist es so«, meinte Julia nach kurzem Nachdenken, »dass die weiße Wand das Licht der Taschenlampe festhält und deshalb hell wird. Aber an dem glatten Spiegel flutscht das Licht irgendwie ab, und deshalb sehen wir auf ihm auch keinen Lichtfleck.«

Herr Sommer verzog keine Miene, sondern bat Julia, von dem gespiegelten Lichtfleck aus in Richtung Spiegel zu blicken. »Na, was siehst du da, Julia?«

»Da seh ich die Taschenlampe im Spiegel. Sie ist sehr hell und blendet mich. Es ist fast ein wenig unangenehm.«

»Und jetzt gehe mal zum Spiegel und blicke in Richtung Taschenlampe!«

»Das sieht genau so aus. Na, vielleicht ist es noch ein bisschen greller. Und wenn ich jetzt blinzele, dann seh ich immer noch einen hellen Fleck, egal, wo ich hinschaue.«

»Ah, das kenne ich«, meinte Anne. »Wenn ich für kurze Zeit in die Sonne schaue – lange darf man ja nicht hineinschauen, weil es den Augen schadet –, sehe ich auch nachher noch eine Weile einen hellen Fleck, sogar mit geschlossenen Augen. Da ist vielleicht immer noch etwas von dem grellen Sonnenlicht in meinen Augen?«

»Ja, so könnte man es ausdrücken«, erwiderte Herr Sommer. »Wenn besonders grelles Licht in die Augen fällt, verursacht es solche Nachbilder. Es dauert dann eine Weile, bis sich die Augen wieder erholt haben. Wenn wir also in Richtung eines leuchtenden Gegenstands blicken, z. B. in eine Taschenlampe oder eine Kerzenflamme, fällt sein Licht in unsere Augen und wir sehen den Gegenstand. Seid ihr damit einverstanden?«

»Ja, wie soll es denn sonst sein«, antwortete Felix. »Und wenn das Licht von der Taschenlampe nicht direkt in unser Auge fällt, sondern erst auf einen Spiegel und dann in unser Auge, sehen wir die Taschenlampe auch, nur eben im Spiegel.«

»Gut, genau so weit ist uns das also klar«, sagte Herr Sommer. »Wir sehen die Taschenlampe, ob direkt oder im Spiegel, weil ihr Licht in unser Auge fällt. – Nun sehen wir aber nicht nur Dinge, die von sich aus leuchten, so wie diese Taschenlampe oder die Sonne oder eine Kerzenflamme. Wir sehen z. B. diesen Lichtfleck hier an der Wand. Wie erklärt ihr euch denn das?«

»Julia hat es doch vorhin schon gut erklärt«, antwortete Felix. »Die weiße Wand hält das Licht fest, das auf sie fällt, und deshalb wird sie dort hell. Und wenn wir diesen Lichtfleck anblicken, sehen wir ihn.«

»Ist das nicht sonderbar?«, fragte Herr Sommer. »Die Taschenlampe sehen wir, weil ihr Licht in unser Auge fällt, aber einen von der Taschenlampe auf eine weiße Wand geworfenen Lichtfleck sehen wir, weil wir diesen Fleck anblicken. Hast du es so gemeint, Felix?«

»Ja, schon, aber jetzt finde ich es auch nicht mehr so überzeugend. Warum sagen Sie uns nicht einfach, wie es wirklich ist?«

»Nun, das möchte ich lieber nicht«, antwortete Herr Sommer. »Über das Sehen haben Menschen seit über 2000 Jahren nachgedacht und dabei ganz unterschiedliche Vorstellungen entwickelt. Darunter waren auch welche, die der von Julia und dir sehr nahe kommen. Ich könnte euch natürlich sagen, welche Vorstellungen sich heutige Physiker vom Licht und vom Sehen machen. Aber ich möchte euch lieber dabei helfen, eure bisherigen Vorstellungen über das Sehen zu überprüfen. Ich

habe euch z. B. absichtlich in eine sehr helle Lichtquelle blicken lassen, damit ihr deutlich spüren könnt, dass beim Sehen etwas in euren Augen passiert.«

Es entstand eine kleine Pause, in der sich niemand so recht traute, etwas zu sagen. Schließlich sagte Julia: »Vielleicht wollten Sie uns zeigen, dass von *allen* Dingen Licht in unser Auge kommen muss, um sie zu sehen, also auch von diesem Lichtfleck an der Wand?«

Als Herr Sommer zustimmend nickte, fuhr sie fort: »Dann dürfte das Licht aber nicht einfach auf der Wand liegen bleiben, sondern von der Wand auch irgendwie wieder weggehen und in unser Auge fallen.«

»Genau darauf wollte ich hinaus«, bestätigte Herr Sommer. »Wie könntest du denn nachweisen, dass von dem Lichtfleck an der Wand Licht ausgesandt wird, Julia?«

Julia schaute sich Hilfe suchend um. »Anne, fällt dir etwas ein? Du hast doch immer so praktische Ideen.«

»So, meinst du? Die einzige praktische Idee, die ich dazu habe, ist die, Herrn Sommer zu fragen, ob er uns nicht noch einen kleinen Tipp gibt!«

»Ich will einmal so antworten: Wenn ich etwas untersuchen möchte, richte ich es nach Möglichkeit so ein, dass störende Einflüsse ausgeschaltet sind. In diesem Fall würde mich zum Beispiel das viele Licht stören, das von draußen durch das Fenster ins Zimmer und auch auf die Wand und auf alles andere fällt.«

Felix Miene hellte sich auf. »Sie meinen, wir sollten den Rollladen herunterlassen?«

»Ich versteh immer noch nicht, was das bringt«, sagte Anne. »Wie willst du denn herauskriegen, ob das Licht auf der Wand liegen bleibt oder nicht?«

»Ich hab da so eine Idee«, antwortete Felix. »Wir machen zuerst das Zimmer ganz dunkel und dann knipsen wir die Taschenlampe an und richten ihr Licht genau wie vorhin auf die Wand. Wenn Julia Recht hat und das Licht auf der Wand liegen bleibt, also nicht wieder weggeht, dann muss der übrige Raum ganz dunkel bleiben. Verstehst du, Anne?«

»Versuchen können wir es ja«, meinte Anne, aber man merkte, dass sie nicht so ganz überzeugt war.

Herr Sommer schaltete die Deckenbeleuchtung ein und ließ den Rollladen herunter. Als er für kurze Zeit die Lampe wieder ausschaltete, konnten sich alle davon überzeugen, dass das Zimmer vollkommen finster war. Felix knipste die Taschenlampe an und hielt sie dicht vor die weiße Wand. »Jetzt schaut euch einmal die übrigen Wände und die Decke an. Die sind tatsächlich ein bisschen hell. Sogar hier auf die gegenüberliegende Wand fällt noch etwas Licht. Das muss von der beleuchteten Wand kommen, denn die Taschenlampe kann ja unmöglich nach hinten scheinen.«

»Ich hab eine Idee«, sagte Julia. »Gib mir einmal die Taschenlampe.«
Julia stellte sich mit dem Rücken zur Wand und richtete den Lichtkegel unmittelbar auf ihr rotes T-Shirt. Jetzt war alles in ein schwaches, gleichmäßig rotes Licht getaucht.

»Das ist der Beweis, dass das Licht nicht auf den Gegenständen liegen bleibt, sondern von da aus wieder weggeht«, sagte Felix befriedigt. »Von wo, wenn nicht von deinem roten T-Shirt, sollte denn sonst die rote Farbe herkommen!?!«

Jetzt kamen noch Annes grünes T-Shirt an die Reihe – die weißen Wände des Zimmers wurden schwach grün – und dann noch ein Buch mit einem schwarzen Umschlag. Der Lichtfleck der Taschenlampe war auf der schwarzen Fläche kaum zu sehen und die umgebenden Wände blieben im Dunkeln.

Schließlich richtete Julia die Taschenlampe direkt auf den Spiegel. Welch ein Unterschied zu vorher! Direkt dem Spiegel gegenüber erschien ein großer heller Lichtfleck, der zu wandern anfangt, wenn Julia die Taschenlampe vor dem Spiegel hin und her schwenkt. »Wenn das Licht schräg auf den Spiegel fällt, dann geht es nach der anderen Seite weiter wie ein Ball, der an einer Wand abprallt.«

»Und jetzt wird mir auch klar, warum wir auf Julias T-Shirt einen Lichtfleck sehen, aber nicht auf dem Spiegel«, ergänzte Felix. »Wenn das Licht von dem T-Shirt in alle möglichen Richtungen weggeht, fällt auch immer ein kleines bisschen davon in meine Augen, und deshalb sehe ich das T-Shirt. Wenn aber das Licht auf den Spiegel fällt, geht es nur in eine ganz bestimmte Richtung, und wenn dort nicht zufällig gerade meine Augen sind, dann seh ich eben gar nichts im Spiegel.«

»Genau so ist es«, bestätigte Herr Sommer, »ich hätte es nicht besser ausdrücken können, Felix.«

»Aber Sie hätten es doch sicher viel wissenschaftlicher ausgedrückt als ich!«

»Nicht unbedingt. Wir kommen doch bisher sehr gut mit unserer Alltagssprache aus. Im Gespräch mit einem anderen Physiker würde ich vielleicht den einen oder anderen Fachausdruck benutzt haben.«

»Und wie würde sich das dann anhören?«, fragte Anne.

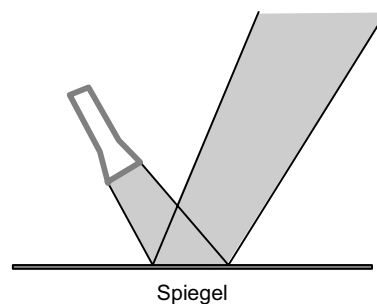
»Nun, umgangssprachlich sagen wir, dass Licht auf einen Gegenstand fällt und von diesem wieder weggeht. Ein Physiker würde davon sprechen, dass Licht an diesem Gegenstand reflektiert wird, und diesen Vorgang würde er Lichtreflexion oder kürzer Reflexion nennen. Und wenn ein Physiker ausdrücken will, dass das Licht an einer weißen Wand ganz anders als an einem Spiegel reflektiert wird, würde er bei der Wand von diffuser und beim Spiegel von regulärer Reflexion sprechen.«

Lichtstrahlen und wie sie reflektiert werden

Herr Sommer wischte die Tafel sauber und schaute in die Runde. »Na, wer will es einmal versuchen, aufzuzeichnen, wie sich das Licht am Spiegel verhält?«

»Das muss Julia machen«, sagte Anne. »Sie kann am besten zeichnen.«

»Ich kann es ja einmal versuchen«, sagte Julia und ging zur Tafel. »Das Licht der Taschenlampe fällt auf den Spiegel:



... und wird dort umgelenkt. Wie haben Sie dazu vorhin gesagt? Was für eine Reflexion ist das?«

»Eine reguläre Reflexion«, antwortete Herr Sommer. »Das heißt so, weil man hier eine einfache Regel erkennen kann: Wenn das Licht, so wie du es gezeichnet hast, schräg von einer Seite kommt, wird es unter dem gleichen Winkel zur anderen Seite reflektiert.«

»Also bei der regulären Reflexion am Spiegel«, fuhr Julia fort, der das neue Wort sichtlich Vergnügen bereitete, »geht das Licht genau so, wie es von links kommt, nach rechts weg.«

Felix schüttelte den Kopf. »Das Licht der Taschenlampe fällt doch aber unterschiedlich schräg auf den Spiegel und wird auch unterschiedlich schräg reflektiert. Da wüsste ich jetzt nicht, wie das Licht, das den Spiegel an einer ganz bestimmten Stelle trifft, nach der Reflexion weiterläuft.«

»Was schlägst du vor, Felix?«, fragte Herr Sommer.

»Man müsste den Lichtkegel der Taschenlampe irgendwie enger machen«, antwortete Felix. »Wie wär es, wenn wir einfach vor die Taschenlampe ein Stück Pappkarton mit einem kleinen Loch kleben?«

Anne fackelte nicht lange und schnappte sich ein Stück Pappe. Sie bohrte mit dem angespitzten Ende eines Bleistiftes ein kleines Loch hinein und hielt die Pappe so vor die Taschenlampe, dass genau die Mitte ihres Lichtkegels freien Durchgang durch das Loch fand. »Mist!«, rief

sie enttäuscht. »So eine elende Funzel. Durch das kleine Loch kommt ja kaum noch Licht. Aber die Idee ist doch gut! Oder?«

»Die Idee ist sogar ausgezeichnet«, tröstete sie Herr Sommer, »nur die Mittel, sie umzusetzen, sind nicht gerade ideal. Aber ich habe da etwas, damit werdet ihr mehr Erfolg haben.«

Herr Sommer holte ein kleines, schwarzes Kästchen und entnahm ihm etwas, das wegen des goldenen Clip, mit dem es an der Jackentasche befestigt werden konnte, wie ein etwas zu kurz geratener Füllfederhalter aussah. Er drückte auf einen kleinen Knopf unter dem Clip und auf der gegenüberliegenden Wand erschien ein knapp erbsengroßer, hell leuchtender roter Punkt.

»Das ist ein so genannter Laser«, sagte Herr Sommer. »Den habe ich manchmal bei Vorträgen benutzt, wenn ich die Zuschauer auf ein bestimmtes Detail hinweisen wollte. Der kleine, rote Punkt ist nämlich so hell, dass man ihn praktisch bei jeder Beleuchtung sieht.«

»Oh, darf ich auch mal?«, fragte Anne und ließ sich den Laser geben. »Aha, hier vorne aus dieser Öffnung kommt das rote Licht heraus. Wenn ich die zuhalte, verschwindet der rote Punkt an der Wand.«

Anne richtete den Laserstrahl auf den Spiegel. Auch jetzt sah man den Auftreffpunkt nicht, sondern nur das reflektierte Laserlicht. Je schräger der Spiegel getroffen wurde, umso schräger wurde das Licht an ihm reflektiert.

»Schade, dass wir das Licht nicht auch unterwegs vom Laser zum Spiegel und vom Spiegel bis zur Wand verfolgen können«, meinte Julia. »Da könnte man doch direkt sehen, wie der Lichtstrahl am Spiegel kehrt macht. Man müsste es irgendwie ...«

»Da gibt es einen einfachen Trick«, unterbrach sie Niki. »Den hat uns unser Physiklehrer vorgemacht. Er hat Zigarettenrauch ins Licht geblasen, und dann konnte man es ganz deutlich sehen.«

»Wir wollen doch aber das Zimmer nicht mit Zigarettenqualm verpesten«, protestierte Anne. »Geht's nicht auch mit was anderem?«

Herr Sommer nahm den Laser und stellte einen der gepolsterten Stühle mitten in den Raum. »Julia, würdest du bitte die Deckenlampe ausknippen? – Jetzt schaut einmal auf die Luft direkt vor dem Laser!«

Als Herr Sommer den Laser anknipste, sah man zunächst nichts Außergewöhnliches. Als er aber mit der freien Hand ein paar Mal kräftig auf das Stuhlpolster klopfte, tanzten auf einmal Tausende von hell erleuchteten kleinen Staubpartikeln in dem Lichtstrahl.

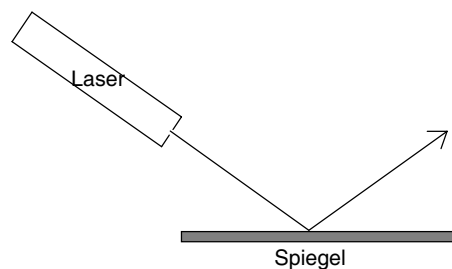
»Habt ihr verstanden, warum man den Laserstrahl in staubiger Luft sieht, in sauberer aber nicht?«, fragte Herr Sommer in die Runde.

»Ich denke, es ist so«, antwortete Julia, »Licht können wir ja nur sehen, wenn es in unsere Augen fällt. In staubiger Luft fällt das Licht des

Lasers auf viele kleine Staubteilchen und wird daran in alle möglichen Richtungen reflektiert. Ein ganz kleines bisschen davon geht dann auch zu meinen Augen hin und ich sehe das helle Staubteilchen. Ja, so kann es eigentlich nur sein.«

Als Herr Sommer die Luft vor dem Spiegel ordentlich staubig gemacht hatte und der Laser schräg auf den Spiegel gerichtet wurde, sah man es ganz deutlich: Der jetzt auch unterwegs rot leuchtende Laserstrahl machte an der Spiegeloberfläche eine scharfe Spitzkehre.

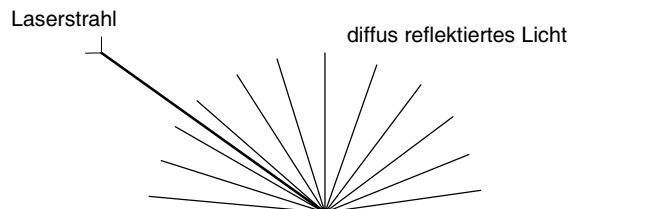
Julia wischte die Tafel ab und machte eine neue Zeichnung.



Das schmale Lichtbündel des Lasers traf den Spiegel und wurde zur anderen Seite hin reflektiert.

»Und wie würdest du die diffuse Reflexion zeichnen, Julia?«, fragte Herr Sommer.

»Da wird das Licht nach allen Richtungen hin reflektiert, also ungefähr so:



Und wenn ich, egal, wo ich gerade stehe, zu dem Lichtfleck hinsehe, dann sehe ich ihn, denn ein bisschen von dem reflektierten Licht fällt in mein Auge.«

»Und so ist es mit allen Gegenständen, die nicht selbst leuchten«, ergänzte Herr Sommer. »Wenn sie von einer Lichtquelle beleuchtet werden, fällt ein Teil des an ihnen diffus reflektierten Lichts in mein Auge, sodass ich sie sehen kann. Nur bei Spiegeln oder anderen spiegelnden Gegenständen, z. B. einer Metallkugel, ist die Reflexion anders. Wenn ich in einen Spiegel hineinschaue, sehe ich deshalb auch nicht die Spiegel-

oberfläche, sondern mich selbst oder andere Gegenstände, die sich darin spiegeln.«

Felix nahm seine Brille ab und schüttelte den Kopf. »Zum Sehen gehört ja wohl noch mehr, als dass Licht in mein Auge fällt. Ohne Brille sehe ich ja alles um mich herum total verschwommen. Man müsste das Licht durch die Brille hindurch und ins Auge hinein verfolgen können. Dann würde man vielleicht herausfinden, wie aus dem Licht ein scharfes Bild im Auge wird.«

»Da bringst du mich auf eine Idee, Felix«, sagte Herr Sommer. »Wenn ihr mir ein bisschen Zeit lasst – ihr könnt euch ja in der Küche eine kleine Erfrischung holen –, baue ich das Zimmer in ein Riesenauge um.«

Im Riesenauge – Bildentstehung mithilfe eines Lochs

Herr Sommer suchte und fand eine große schwarze Pappe. Die brachte er auf Fenstergröße und schnitt in die Mitte zwei etwa pfenniggroße Löcher im Abstand von wenigen Zentimetern. Eines der Löcher überklebte er wieder. Als er die Pappe sorgfältig am Fensterrahmen festgeklebt hatte, sodass nur noch durch das eine kleine Loch Licht eindringen konnte, war das Zimmer sehr spärlich beleuchtet.

»Kommt ruhig herein«, ermunterte Herr Sommer seine Gäste, »und schließt die Tür hinter euch. Schaut euch nur um, wie es in so einem Riesenauge aussieht.«

Als sie sich ein wenig an die Dunkelheit gewöhnt hatten, trauten sie ihren Augen nicht. Auf der weißen Wand gegenüber dem Fenster konnten sie ganz deutlich das Bauernhaus von der anderen Straßenseite erkennen. Es stand auf dem Kopf, hatte die Straße über sich und den blauen Himmel unter sich. Eben trat der Nachbarjunge aus der Tür, ging zu seinem Fahrrad und fuhr – mit den Rädern an der Straße hängend – kopfüber davon.

Als Anne sich das Bild aus der Nähe betrachten wollte, merkte sie, dass sie einen Schatten auf die Wand warf. Sie trat zur Seite und streckte die Hand aus. »Seht mal«, rief sie, »jetzt wirft meine Hand einen Schatten auf die Wand, und auf meiner Hand ist ein Teil des Bildes. Das kann nur der Schornstein des Hauses sein. Schon komisch, dass der nach unten in den blauen Himmel hängt!«

Sie ging, immer darauf achtend, dass das Bild des Schornsteins auf ihrer Hand blieb, in Richtung Fenster. »Jetzt wird der Schornstein auf meiner Hand immer kleiner, aber auch immer heller ... und jetzt passt schon fast das ganze Haus auf meine Hand. – Ich glaube, alles kommt aus dem hellen Loch hier heraus!«

Sie trat ganz nahe ans Fenster und äugte durch das Guckloch nach draußen. »Passt auf, gleich kommt ein rotes Auto!«, rief sie. »Jetzt müsstet ihr es auf der Wand auch sehen!«

»Du bist gut!«, rief Niki und lachte. »Du verdeckst das Loch ja mit deinem Kopf.«

»Ach so, ja, wie dumm von mir. Wenn wieder ein Auto kommt, geh ich schnell zur Seite und schaue mir das Bild selber an. – Achtung! Da hinten kommt ein großer Lkw mit einer blauen Plane! – Tatsächlich, jetzt fährt er mit den Rädern nach oben über die Wand; genau derselbe, sogar die gelbe Schrift auf der blauen Plane kann man sehen. Das ist tatsächlich eine Live-Übertragung, aber alles steht auf dem Kopf!«

»Schaut mal durch das Guckloch nach draußen«, sagte Julia. »Ich habe mich gerade so hingestellt, dass ich die Schrift ANNO 1840 über der Toreinfahrt sehen kann.«

»Und ich sehe einen Teil des Reetdaches«, sagte Felix, der von allen der kleinste war.

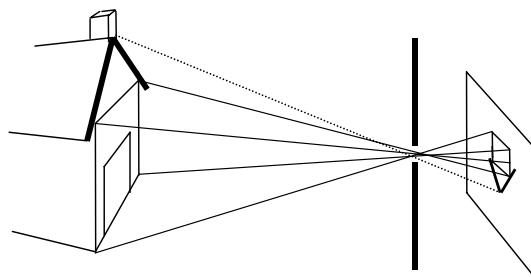
»Und ich muss mich schon ein wenig bücken, damit ich nicht nur den Vorplatz, sondern überhaupt noch etwas vom Haus sehe«, ergänzte Niki, der die anderen um einen Kopf überragte.

»Und wenn ich mich rechts im Zimmer hinstelle und durch das Guckloch schaue«, fügte Anne hinzu, »sehe ich ein Stück vom linken Teil des Hauses, und wenn ich dann nach links gehe, sehe ich was vom rechten Teil.«

»Aber, das ist doch die Erklärung dafür, dass das Haus hier an der Wand auf dem Kopf steht!«, rief nun Julia. »Das Licht, das oben vom Dach kommt und durch das Guckloch fällt, geht nach unten auf die Wand. Und umgekehrt, das Licht von der unteren Hauskante geht durch das Guckloch nach oben.«

»Alles klar«, sagte Anne. »Aus oben wird unten, und aus rechts wird links. Deshalb steht alles auf dem Kopf!«

Julia war zur Tafel gegangen und zeichnete das Bauernhaus und das Bild des Hauses, das durch das Guckloch auf der Wand entstanden war.



Im Riesenauge – Bildentstehung mithilfe eines Lochs **41**

»Ich habe immer nur das Licht gezeichnet, das von den Ecken des Hauses in Richtung des Gucklochs weggeht«, erläuterte Julia ihre Zeichnung. »Natürlich geht von allen Stellen des Hauses Licht weg und deshalb sehen wir hier im Zimmer auch ein vollständiges Bild des Hauses.«

»Was würdet ihr wohl auf der Wand sehen«, fragte Herr Sommer in die Runde, »wenn im Fenster noch ein zweites Loch wäre?«

»Hm, wenn *ein* Loch auf der Wand *ein* Bild macht«, antwortete Julia, »machen *zwei* Löcher vermutlich *zwei* Bilder.«

»Aber an etwas verschiedenen Stellen«, ergänzte Felix. »Denn wenn das Licht, das von einer bestimmten Stelle des Bauernhauses weggeht, durch zwei verschiedene Löcher fällt, dann erscheint diese Stelle doch auch an zwei verschiedenen Stellen auf der Wand hier im Zimmer.«

»Klingt logisch«, sagte Anne.

Herr Sommer öffnete das zweite Guckloch. Tatsächlich, jetzt erschienen auf der Wand zwei Bauernhäuser. Sie waren etwas gegeneinander versetzt, sodass das Bild einen ausgesprochen verwackelten Eindruck machte.

»Und wenn man jetzt noch mehr Löcher reinschneidet«, sagte Anne, »macht jedes Loch sein eigenes Bild. Aber alle Bilder überlappen sich, und alles wird nur noch verschwommener.«

»Richtig!«, bestätigte Julia. »Und wenn wir vom Fenster die ganze Verdunkelung abnehmen, könnten wir uns sogar vorstellen, dass das ganze Fenster aus lauter kleinen Gucklöchern besteht, die dicht bei dicht liegen. Dann würde das Licht vom Himmel durch die unteren Gucklöcher unten auf die Wand und durch die oberen Gucklöcher oben auf die Wand fallen. Die ganze Wand wäre also gleichmäßig hell und vom Bauernhaus oder vom Himmel wäre nichts mehr zu erkennen.«

»Je größer also das Guckloch ist, umso unschärfer wird das Bild«, fügte Felix hinzu. »Oder umgekehrt: Ein kleineres Loch lässt ein schärferes Bild entstehen.«

»Das könnten wir doch leicht ausprobieren«, schlug Anne vor und knipste das Licht wieder an. Sie nahm ein Stück schwarze Pappe, schnitt mit einer Nagelschere ein etwa erbsengroßes Loch hinein und klebte die Pappe mit dem kleineren Loch über das größere Loch.

»Wie ich es erwartet habe«, rief Felix. »Das Bild ist jetzt bei dem kleineren Loch deutlich schärfer. Aber leider auch viel dunkler. – Ja, das leuchtet ein, dass durch ein größeres Loch mehr Licht durchgeht und das Bild heller wird.«

Zebrastrreifen – Lichtbeugung

»Im Prinzip wäre es also möglich, mit einem ganz winzigen Loch ein beliebig scharfes Bild zu bekommen?«, fragte Felix.

»Nach dem, was wir bis jetzt über das Licht wissen, könnte man das vermuten«, antwortete Herr Sommer. »Wenn man das aber überprüfen würde, käme etwas Überraschendes heraus. Zunächst würde das Bild beim Verkleinern des Guckloches tatsächlich schärfer, aber unterhalb einer gewissen Größe würde es wieder unschärfer werden. Das kann ich euch sogar mit einem ganz einfachen Versuch zeigen.«

Herr Sommer schnitt mit einem scharfen Messer einen ungefähr fünf Millimeter schmalen, etwa handlangen Spalt in die schwarze Pappe, mit der das Fenster verklebt war. »So, jetzt setzt euch einmal alle hier gegenüber dem Fenster auf den Fußboden und betrachtet den Spalt. Ich lösche jetzt das Licht. Was seht ihr?«

»Na, was sollen wir schon sehen?«, fragte Anne, die offenbar nichts besonders Spannendes erwartete, »eben einen senkrechten Spalt, ganz hell, weil dahinter der helle Himmel ist.«

»Genau! Mehr sollt ihr im Moment auch gar nicht sehen. Und jetzt kneift ein Auge zu und haltet Zeige- und Mittelfinger senkrecht ganz dicht so vor das andere Auge, dass ihr zwischen den beiden Fingern hindurchsehen könnt. Macht nun langsam den Fingerschlitz enger und immer enger, bis er fast geschlossen ist. Na, was seht ihr da beim Engermachen?«

»Ich seh eigentlich gar nichts«, antwortete Anne. »Also, erst seh ich den Fensterspalt durch den Fingerschlitz hindurch, und dann, wenn die Finger ganz eng sind, seh ich natürlich auch den Spalt nicht mehr!«

»Schau noch einmal genau hin, wie sich der Spalt verändert, während du die Finger ganz langsam immer näher zusammenbringst.«

»Ich glaube, ich sehe da etwas, was mir nicht so ganz geheuer vorkommt«, rief Felix. »Erst ist da natürlich nur der schmale Spalt, aber wenn ich den Schlitz zwischen meinen Fingern noch enger mache, wird der Spalt auf einmal breiter. Er läuft auseinander, und dann sehe ich rechts und links von diesem verschwommenen Spalt viele schmale Spalte, die ganz dicht nebeneinander liegen. Das sieht so ähnlich aus wie ein Zebrastrreifen an einem Überweg für Fußgänger. Seht ihr das auch?«

»Ich weiß nicht so recht«, antwortete Julia, »so etwas Ähnliches sehe ich manchmal auch, aber dann ist es auch gleich wieder weg. Wie ist es bei euch?«

»Ich sehe beim besten Willen keinen Zebrastrreifen. Vielleicht habe ich zu krumme Finger«, meinte Anne lachend.

Herr Sommer zog in ein Stück schwarzes Papier mit einem scharfen Messer einen etwa zehn Zentimeter langen, geraden Schnitt. »Wenn ihr

euch den Spalt am Fenster durch diesen Papierschlitz anschaut und ihn ein ganz klein wenig auseinander zieht und dann wieder enger macht, könnt ihr wahrscheinlich erkennen, was Felix beschrieben hat.«

Jetzt konnten es alle sehen: Der Spalt zerfloss und es entstanden viele schmale, dicht beieinander liegende Spalte rechts und links davon.

»Ich würde ja noch verstehen, dass der Spalt immer dunkler wird, wenn ich den Schlitz immer enger mache«, sagte Felix, »denn dadurch kommt ja immer weniger Licht in mein Auge. Aber der Spalt müsste doch scharf bleiben, vielleicht sogar noch schärfer werden. Das Bild des Bauernhauses auf der Wand ist doch auch schärfer geworden, als wir das Guckloch verkleinert haben! Und hier ist es gerade andersherum. Kann man das verstehen?«

»Im Moment muss ich euch auf später vertrösten«, antwortete Herr Sommer. »Als die Physiker vor 200 Jahren entdeckten, dass sich Licht manchmal so unerwartet verhält, wie ihr das eben beobachtet habt, waren sie auch überrascht und konnten es sich zuerst nicht erklären. Aber nach und nach haben sie eine Vorstellung von den Eigenschaften des Lichts entwickelt, die zu diesem merkwürdigen Verhalten passte. Darauf kommen wir bei den Tönen noch einmal zurück. Da gibt es so ähnlich unerwartete Erscheinungen.«

»Heißt das nun«, fragte Felix, »dass man ein beliebig scharfes Bild überhaupt nicht erzeugen kann?«

»Genau das heißt es. Licht ist so geartet, dass das nicht möglich ist. Es läuft hinter einer kleinen Öffnung nicht nur geradeaus weiter, sondern wird nach allen Richtungen hin gebeugt. – So, jetzt sollten wir aber allmählich Schluss machen.«

»Was machen wir denn morgen?«, fragte Niki.

»Da zeige ich euch etwas, das ihr heute noch für unmöglich gehalten habt«, antwortete Herr Sommer.«

Geknicktes Licht – Lichtbrechung

Als Herr Sommer am nächsten Morgen das Lampenlicht in seinem Arbeitszimmer ausknipste, sahen seine Gäste sofort, dass in der schwarzen Pappe, mit der das Fenster lichtdicht beklebt war, ein besonders großes Guckloch ausgeschnitten worden war.

»Das darf doch nicht wahr sein«, rief Anne erstaunt, »jetzt haben Sie ein viel größeres Loch gemacht, und trotzdem ist das Bild von dem Bauernhaus hier an der Wand richtig scharf und dazu noch unglaublich hell! Das geht doch gar nicht. Hell und gleichzeitig scharf! Also, gestern ging das jedenfalls nicht!«

»Das ist ja auch gar kein gewöhnliches Loch«, sagte Julia, die dicht am Fenster stand. »Da, schaut, vor dem Loch in der Pappe ist ein rundes Glas, das hat sicher etwas damit zu tun, dass das Bild heute so gestochen scharf ist.«

»Probieren wir es doch einfach aus!« Anne zog den Klebestreifen, mit dem das Glas auf der Pappe befestigt war, ab. Das Bild blieb zwar hell, war aber nun ganz verschwommen.

»Ich kann euch das erklären«, meldete sich nun Niki zu Wort. »Also das Glas vor dem Loch ist kein gewöhnliches Glas, sondern eine Linse. Und mit Linsen bekommt man eben scharfe Bilder. So wie beim Fotoapparat. Da ist vorne auch eine Linse und nicht nur ein kleines Loch. Das Bild hinter so einer Linse ist aber nur an einer ganz bestimmten Stelle scharf. Und dort ist dann beim Fotoapparat der Film!«

»Das mag ja sein«, sagte Julia, »aber das ist doch keine Erklärung. Wie kommt denn so eine Linse dazu, scharfe Bilder zu machen?«

»Nun«, antwortete Niki etwas verlegen, »das ist ziemlich kompliziert. Unser Physiklehrer hat immer solche Striche hinter und vor der Linse an die Tafel gezeichnet, und wo die sich schneiden, hat er gesagt, da wäre das Bild.«

»Damit kann ich nichts anfangen, Niki«, sagte Anne ungeduldig. »Ich will es selber verstehen. Herr Sommer, wie ist das nun mit diesem besonderen Glas?«

»Das ist ein Brillenglas«, antwortete Herr Sommer. »Es ist in der Mitte ein ganz klein wenig dicker als am Rand ist. – Aber nicht nur damit bekommt man scharfe Bilder. Hier, diese kugelförmige Glasvase tut es auch.« Er füllte sie mit Wasser und hielt ihren Kugelbauch an das Guckloch. Das Bild auf der Wand verschwand zwar, aber als er eine weiße Pappe wenige Zentimeter hinter die Vase hielt, entstand darauf ein sehr helles und scharfes Bild des Bauernhauses. »Um das zu verstehen, müssen wir etwas genauer untersuchen, was mit Licht passiert, wenn es von Luft auf einen durchsichtigen Körper trifft, wie etwa auf Glas oder Wasser.«

»Wir müssten doch nur den Laser aufs Wasser halten, dann würden wir ja sehen, was mit dem Licht passiert«, schlug Felix vor.

Anne ließ das Waschbecken voll Wasser laufen, nahm den Laser und leuchtete damit schräg ins Wasser. »Da sieht man ja nur die Stelle, an der der Lichtstrahl auf den Beckenboden auftrifft.«

»So einfach kann es ja gar nicht gehen«, sagte Julia. »Gestern mussten wir auch erst die Luft ein wenig staubig machen, um den Lichtstrahl in der Luft zu sehen. Wir müssten etwas hineintun, was im Wasser schwebt wie Staub in der Luft.«

»Ihr könntet es mit Milch versuchen«, riet ihnen Herr Sommer. »Die Fetttropfchen in der Milch wirken genau so wie gestern der Staub

in der Luft. Wartet, ich hole ein wenig Kaffeesahne aus dem Kühlschrank.«

»Wie viel soll ich hineinschütten?«, fragte Anne, nachdem Herr Sommer zurückgekommen war und ihr den Sahnebecher gereicht hatte.

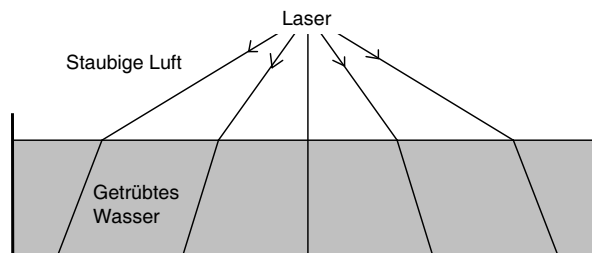
»Ganz wenig, nur ein paar Tropfen. Wenn du zu viel nimmst, wird das Wasser zu trübe.«

»Und jetzt noch ein bisschen Staub in die Luft«, kommandierte Anne. »Niki, mach dich mal nützlich und bring den Stuhl hier zum Waschbecken und hau ordentlich aufs Polster!«

Nachdem das Wasser getrübt und die Luft eingestäubt war, leuchtete Anne ein zweites Mal schräg auf die Wasseroberfläche.

Es klappte auf Anhieb. Der rote Laserstrahl ließ die Staubteilchen über dem Wasser aufblitzen und hinterließ auch in dem leicht getrübt Wasser eine sichtbare Spur. Der Strahl tauchte mit einem deutlich sichtbaren Knick ins Wasser ein und prallte schließlich auf dem Beckenboden auf, wo er einen sehr hellen, roten Lichtfleck machte. Je schräger der Strahl auf die Wasseroberfläche traf, um so stärker wurde er dort geknickt. Traf er senkrecht auf, ging er kerzengerade ins Wasser hinein.

Julia wischte die Tafel sauber und hielt das Ergebnis in einer Zeichnung fest.



»Die Physiker nennen die Erscheinung, dass das Licht an der Wasseroberfläche einen Knick bekommt, Lichtbrechung«, kommentierte Herr Sommer Julias Zeichnung. »Es kann natürlich auch vorkommen, dass Licht den Weg vom Wasser in die Luft nimmt. Was meint ihr, wie sich Licht dann an der Wasseroberfläche verhält?«

»Wir könnten doch den Laser unter Wasser halten und sein Licht von da in die Luft gehen lassen«, meinte Anne.

»Das würde ich lieber nicht ausprobieren«, sagte Herr Sommer. »Ich bin mir nicht sicher, ob der Laser so ein Tauchbad überleben würde.«

»Wie wäre es mit einem Spiegel im Wasser?«, schlug Niki nach einer Weile des Nachdenkens vor. »Den Spiegel müssten wir so halten, dass der Laserstrahl genau senkrecht auf ihn fällt. Dann wird das Laserlicht

an ihm gespiegelt und läuft auf demselben Weg wieder zurück. Es ist dann also so, als ob im Wasser auch so ein Laser wäre. Und nun kommt's: Wenn der Lichtknick aus dem Wasser heraus anders ist als ins Wasser hinein, dann würden wir das sofort sehen!«

»Niki!«, rief Anne fassungslos, »Das ist ja genial. Da hast du dich ja selbst übertroffen. Natürlich, so machen wir's.«

Nachdem Niki von Herrn Sommer einen kleinen Taschenspiegel erhalten hatte, führte er seinen Plan aus. Er leuchtete mit dem Laser schräg auf das Wasser und tauchte den Spiegel so ins Wasser, dass er vom Laserstrahl getroffen wurde. Als er durch eine leichte Drehung des Spiegels den Eintritt des Strahls ins Wasser und den Austritt aus dem Wasser exakt zur Deckung gebracht hatte, war das Ergebnis eindeutig: Der gespiegelte Strahl machte genau den gleichen Knick und kroch brav in die Laseröffnung zurück.

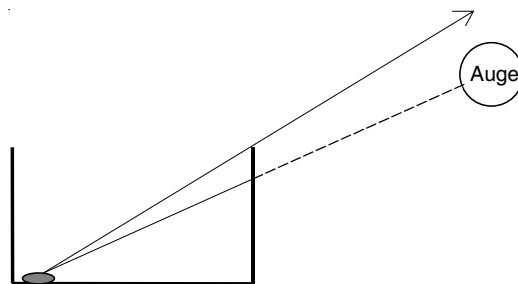
»Jetzt haben wir's«, sagte Niki, sichtlich mit sich zufrieden. »Egal, in welcher Richtung das Licht läuft, ob ins Wasser hinein oder aus ihm heraus, Brechung ist Brechung und Knick ist Knick!«

Um die Ecke sehen

Herr Sommer legte eine Münze auf den Boden des Waschbeckens und bat seine Gäste, sich so zu postieren, dass ihnen der Waschbeckenrand den Blick auf die Münze gerade verwehrte. Dann ließ er Wasser einlaufen, und ab einer bestimmten Wasserhöhe erschien ihnen zunächst der hintere Rand der Münze und nach und nach das ganze Geldstück. »Jetzt wisst ihr eigentlich genug über die Lichtbrechung, um euch den Trick mit der eingetauchten Münze erklären zu können. Vielleicht versucht ihr es einmal mit einer Zeichnung?«

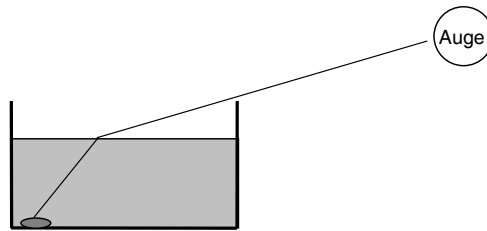
»Julia, du kannst das am besten«, sagte Anne schließlich. »Versuch es mal.«

»Na gut, ich zeichne und du erklärst.«



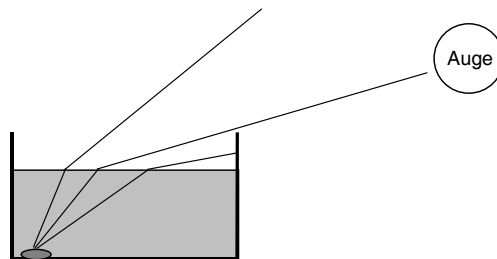
Um die Ecke sehen **47**

»Das soll wohl das Waschbecken mit der Münze sein, bevor das Wasser eingelassen wurde«, erklärte Anne die Zeichnung. »Und wenn das mein Auge ist, dann kann ich damit die Münze nicht sehen, weil ja kein Licht, das von der Münze weggeht, in mein Auge fällt. Ich müsste größer sein oder ein wenig näher herangehen, um sie zu sehen.«



»Jetzt hast du also Wasser eingelassen, und das Licht von der Münze wird an der Wasseroberfläche so gebrochen, dass es in mein Auge hineingeht.«

Julia zeichnete ein paar zusätzliche Lichtstrahlen ein.



Anne überlegte eine Weile. Dann hellte sich ihre Miene auf. »Ach so, die Münze reflektiert ja das Licht in alle möglichen Richtungen. Der obere Lichtstrahl läuft natürlich weit an meinem Auge vorbei, der untere prallt auf die Beckenwand. Nur der mittlere Strahl fällt nach der Brechung in mein Auge. Alles klar.«

»Vielleicht könntest du noch die Stelle einzeichnen, Julia, an der die Münze scheinbar liegt«, schlug Herr Sommer vor.

Julia schaute ihn fragend an. »Was meinen Sie damit, dass die Münze scheinbar irgendwo liegt?«

»Nun, sieht es nicht so aus, als ob die Münze nur wenige Zentimeter unter der Wasseroberfläche liegt?«, fragte Herr Sommer zurück. »Dann miss doch einmal nach, wie hoch das Wasser im Becken tatsächlich steht.«

Julia tauchte ein Lineal mit Zentimetereinteilung bis zur Münze auf dem Beckengrund ein. Das Wasser stand bis zu einer Höhe von zehn

Zentimetern. Aber merkwürdig! Wenn man schräg auf die Wasseroberfläche blickte, lagen die Zentimeterstriche unter Wasser viel näher beisammen als über Wasser.

Anne schob ihre Hand senkrecht ins Wasser, um die »wahre« Wassertiefe zu überprüfen. Das Wasser war tatsächlich viel tiefer als es aussah, denn ihre ausgestreckten Finger und noch ein Teil des Handtellers waren untergetaucht. »Schaut euch bloß einmal meine Finger unter Wasser an«, rief sie verblüfft. »Was für kurze Stummelchen das sind, und je flacher ich aufs Wasser schaue, umso kürzer werden sie.«

Auch allerlei andere Gegenstände wurden jetzt unter Wasser getaucht. Den größten Spaß hatten sie mit einer Zeitungsbeilage aus Hochglanzpapier, auf der ein muskelbepackter Mann Reklame für Bademoden machte. Tauchte man ihn stehend ins Wasser, dann wurde seine Figur infolge seiner geschrumpften Körperlänge ungewöhnlich breit. Tauchte man ihn aber liegend hinein, dann schien er dünn wie ein Spargel zu sein. Aber wie war das zu erklären?

»Sonderbar«, sagte Felix, nachdem er sich noch einmal die unter Wasser liegende Münze von der Seite angeschaut hatte. »Ich sehe die Münze und mit ihr den ganzen Beckenboden angehoben, also an einer Stelle, wo sie eigentlich gar nicht ist. Das ist sonst ja nicht so. Da sehe ich doch die Dinge immer dort, wo sie sich tatsächlich befinden.«

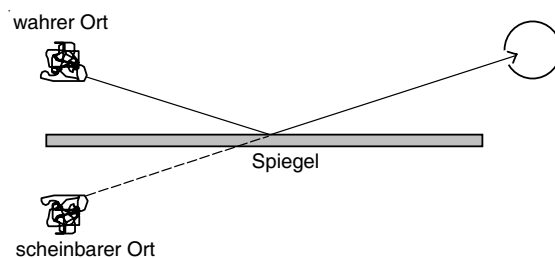
»Da wäre ich mir nicht so sicher«, meinte Herr Sommer. »Was siehst du denn, wenn du in den Spiegel blickst, Felix?«

»Na, halt mich.«

»Aha, da steht also dein Zwillingbruder hinterm Spiegel und äfft dich nach?«

Felix kratzte sich am Kopf und dachte angestrengt nach. »Sie meinen, da sehe ich auch etwas an einer Stelle, das in Wirklichkeit dort gar nicht ist?«

»Genau! Wenn ich einen Gegenstand im Spiegel betrachte, wird ja das Licht an der Spiegeloberfläche umgelenkt, ungefähr so:



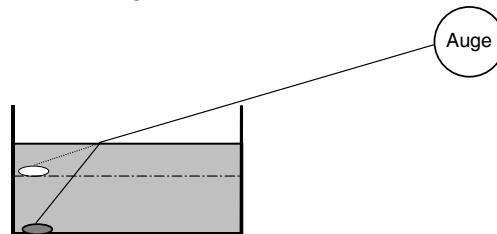
In mein Auge fällt also Licht, das scheinbar von einem Gegenstand ausgesandt wurde, der hinter dem Spiegel liegt. Und deshalb sehe ich

den Gegenstand in der Richtung, in der das am Spiegel reflektierte Licht in mein Auge fällt. Na, Julia, verstehst du jetzt meine Frage von vorhin? Wo also ist der scheinbare Ort der Münze?»

Julia überlegte eine Weile. »Ich sehe einen Gegenstand immer in der Richtung, aus der das Licht, das von ihm weggegangen ist, in mein Auge fällt. Wenn aber das Licht auf seinem Weg seine Richtung ändert, wenn es also z. B. an einem Spiegel reflektiert oder an einer Wasseroberfläche gebrochen wird, sehe ich den Gegenstand nicht mehr dort, wo er sich tatsächlich befindet, sondern an einem davon verschiedenen Ort. Habe ich das soweit richtig verstanden?»

»Ich hätte es nicht besser ausdrücken können«, antwortete Herr Sommer.

»Also, dann dürfte es ja nicht allzu schwer sein«, fuhr Julia fort und ergänzte ihre Zeichnung.



»So muss es sein«, sagte Anne. »Wenn ich schräg auf die Wasseroberfläche schaue, sieht es so aus, als ob die Münze angehoben wäre. Und wenn ich mit der Hand nach der Münze grapsche – Moment, ich versuche das einmal –, greife ich natürlich zu hoch.«

»Genau so würde es dir auch ergehen, wenn du einen Fisch mit einem Speer treffen wolltest, den du schräg ins Wasser schleuderst und mit dem du dabei auf den Fisch zielst«, sagte Herr Sommer.

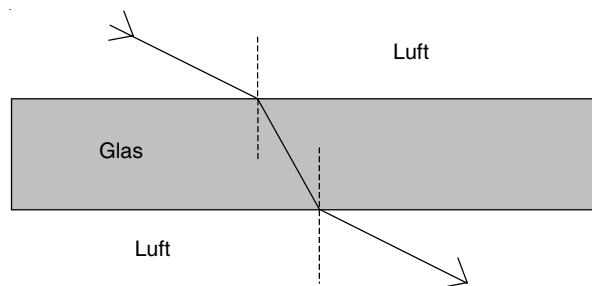
»Ich verstehe«, sagte Anne. »Um den Fisch zu treffen, müsste ich absichtlich zu tief zielen.«

»Umso erstaunlicher ist es«, fuhr Herr Sommer fort, »dass es Tiere gibt, die auf diese Art Fische fangen. Wenn z. B. ein Fischadler auf Fischfang geht, ortet er seine Beute aus etwa dreißig Meter Höhe, fliegt dann in schrägem Winkel auf die Wasseroberfläche zu, fährt kurz vor dem Aufprall seine Greiffüße aus, stößt ins Wasser, taucht ganz unter, und mit ein bisschen Jagdglück hält er einen Fisch in seinen Fängen. Würde man einem solchen Fischadler eine kleine Fernsehkamera auf seinen Kopf montieren, so würde sie uns zeigen, dass sich der Adler scheinbar zu steil ins Wasser stürzt und den Fisch eigentlich verfehlen müsste. Würde er aber so ins Wasser stoßen, wie die Kamera den Fisch zeigt, würde er zu hoch greifen.«

Linsen

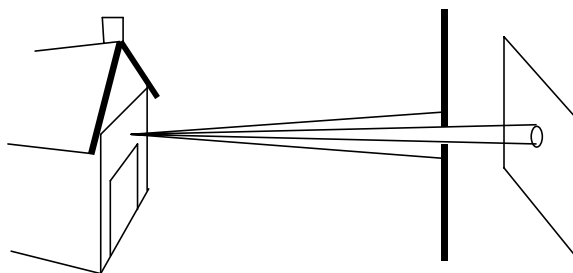
»Eigentlich wollten wir ja verstehen, warum eine Linse ein scharfes Bild von dem Bauernhaus macht«, sagte Julia. »Wir müssten das Licht, das vom Bauernhaus weggeht, auf seinem Weg durch die Linse hindurch verfolgen und sehen, ob das irgendwie hinter der Linse zu einem scharfen Bild führt.«

Herr Sommer nickte und ging zur Tafel. »Ich schlage vor, wir schauen uns vorher erst einmal einen etwas einfacheren Fall an. Wenn z. B. ein Lichtstrahl durch eine Glasplatte geht, dann wird er an beiden Glasoberflächen so gebrochen:

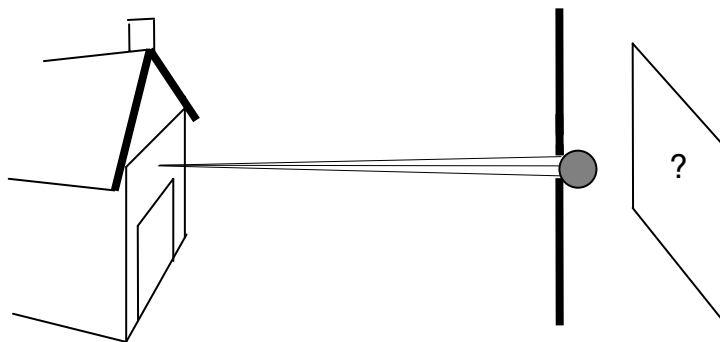


An beiden Knickstellen habe ich eine Hilfslinie gezogen, die senkrecht auf der Glasoberfläche steht. Ins Glas hinein wird das Licht also zur Senkrechten hin gebrochen, aus dem Glas heraus von der Senkrechten weg. – Jetzt seid ihr eigentlich gut gerüstet, um euch klarzumachen, wie man z. B. mit der wassergefüllten Kugelvase ein scharfes Bild des Bauernhauses erzeugen kann. Ihr braucht ja nicht gleich das ganze Bauernhaus abzubilden. Es genügt, wenn ihr euch überlegt, was z. B. mit einem kleinen weißen Fleck auf dem Haus passiert.«

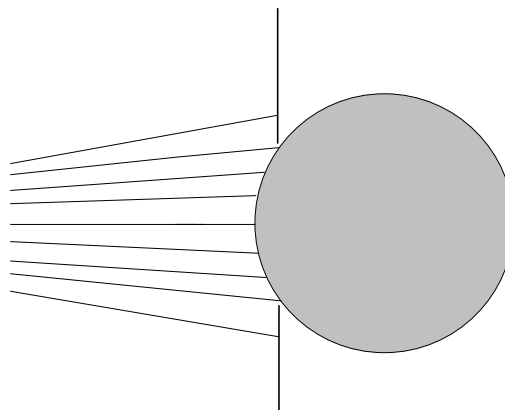
»Nun, bei einem Guckloch ohne Linse«, begann Julia und zeichnete dabei, »sieht das so aus:



Das Licht geht nach allen möglichen Richtungen von dem Fleck am Haus weg. Ein Teil fällt durch das Guckloch und macht auf der Wand oder auf einem Papier einen Lichtfleck, der umso größer ist, je größer das Guckloch ist. Wenn jetzt die Kugelvase im Guckloch sitzt, sieht das so aus:



Vielleicht sollte ich das Loch und die Kugel noch einmal etwas größer zeichnen.

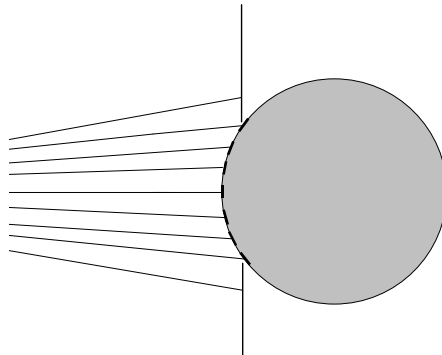


Hm, jetzt habe ich aber ein Problem: Die Glasoberfläche ist ja gewölbt, und wir wissen doch gar nicht, wie sich das Licht verhält, wenn es auf etwas Krümmes auftrifft.«

»Das ist doch dem Licht egal«, meinte Anne.

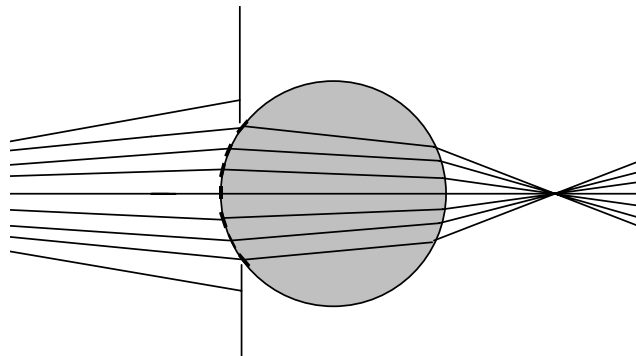
»Dem Licht vielleicht schon, aber mir nicht«, fuhr Julia fort. »Bei einer gekrümmten Glasoberfläche, weiß ich doch gar nicht, unter welchem Winkel das Licht auftrifft.«

Herr Sommer schmunzelte und ging zur Tafel. Immer dort, wo in Julias Zeichnung ein Lichtstrahl die Kugeloberfläche traf, begradigte er die gekrümmte Linie.



»Siehst du, Julia, wie gut sich die geraden Stücke an die krumme Linie anschmiegen? Man kann sich also eine gewölbte Oberfläche durch eine Reihe von kleinen ebenen Flächen ersetzt denken und bei denen ist der Auftreffwinkel des Lichtes ja klar.«

»Raffiniert!«, rief Julia und machte sich daran, ihre Zeichnung zu vervollständigen.



»Der mittlere Lichtstrahl geht ohne Knick in das Glas hinein und ebenso knickfrei wieder aus ihm heraus. Licht, das schief auf die Kugel trifft wird mehr oder weniger stark gebrochen, läuft dann gerade durch die Kugel, trifft wieder schief, aber diesmal von innen auf die Kugeloberfläche und wird dort noch einmal gebrochen.«

»Das ist doch aber genau die Antwort auf die Frage, warum in einem bestimmten Abstand hinter der Kugel ein scharfes Bild entsteht«, sag-

te Felix. »Hier, hinter der Kugelvase, wo sich alle Lichtstrahlen schneiden, wird das Licht, das ursprünglich einmal von dem weißen Fleck am Haus weggegangen ist, wieder in einem Punkt vereint. Wenn da ein Blatt Papier ist, dann entsteht aus dem weißen Fleck am Haus ein weißer Fleck auf dem Papier. Und das ist natürlich für alle anderen Stellen des Hauses genau so. Auch die werden als entsprechend helle oder dunkle Stellen auf dem Papier abgebildet. Die Kugel sorgt also dafür, dass die Lichtstrahlen nicht wie bei dem Loch ohne Linse immer weiter auseinander laufen, sondern dass sie aufeinander zustreben. In einem bestimmten Abstand hinter der Kugel kommen sich die einzelnen Strahlen deshalb wieder ganz nahe. Dort gibt es dann ein scharfes Bild!«

»Das hab ich euch doch vorhin schon gesagt«, sagte Niki. »Das Bild ist immer dort, wo sich die Linien schneiden.«

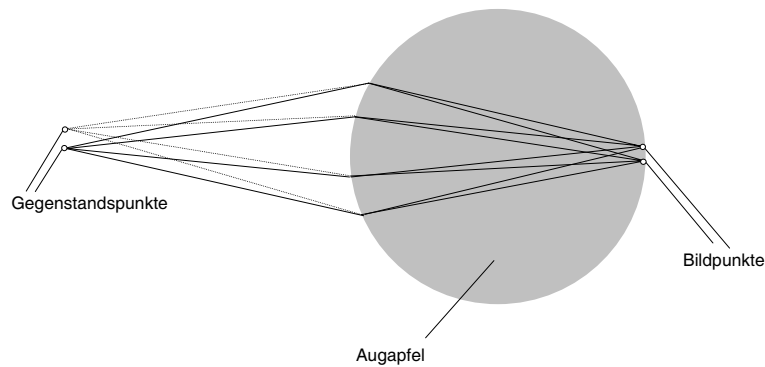
»Ist ja gut, Niki«, sagte Anne, »aber jetzt wissen wir doch, warum das so ist. – Und warum das Bild bei verschiedenen Linsen in unterschiedlichem Abstand entsteht, ist eigentlich auch klar. Wenn die Glasoberfläche stark gekrümmt ist, wie z. B. bei der Kugel, dann trifft das Licht besonders schräg auf und wird stark umgelenkt. Die Folge davon ist, dass sich die einzelnen Lichtstrahlen schon kurz hinter der Kugel treffen. Für mich ist der Fall geklärt. Aber jetzt sagen Sie doch auch mal etwas, Herr Sommer!«

»Das will ich gerne tun. Im Großen und Ganzen habt ihr alles richtig überlegt. Ihr habt allerdings stillschweigend angenommen, dass sich alle Lichtstrahlen hinter der Kugel genau in einem Punkt treffen. Das ist aber nur für diejenigen Strahlen der Fall, die ganz nahe an dem ungebrochenen Mittelstrahl verlaufen. Die Strahlen weiter draußen werden stärker umgelenkt, sodass sich der Lichtkegel hinter der Kugel nicht perfekt zusammenschnürt. Das Bild ist deshalb immer ein wenig unscharf, wenn man diese Randstrahlen nicht ausblendet.«

Schau mir in die Augen

»Bleibe nur noch zu klären, wie das Auge eine scharfe Abbildung zuwege bringt«, fuhr Herr Sommer fort. »Auch das dürfte euch jetzt nicht mehr schwer fallen, wenn ihr euch daran erinnert, wie und wo ein Gegenstand mit einer Kugellinse abgebildet wird. Das menschliche Auge ist nämlich im Wesentlichen kugelförmig. Deshalb spricht man ja auch vom Augapfel.«

»Dann ist es ganz einfach«, sagte Julia und begann sofort mit einer neuen Zeichnung.



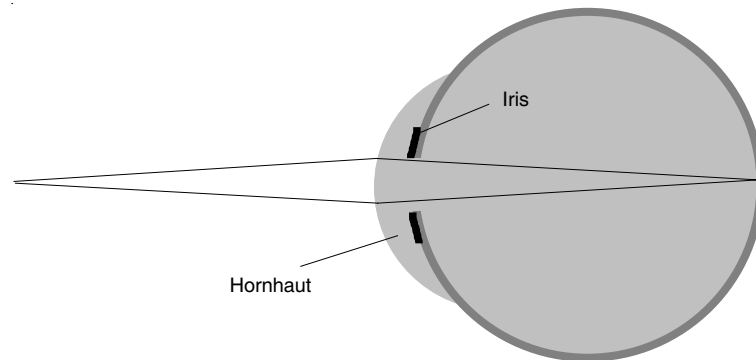
»Jeder Gegenstandspunkt hier links wird durch die Brechung am Augapfel in einen Bildpunkt rechts abgebildet und so entsteht Punkt für Punkt ein scharfes Bild des Gegenstands auf der Innenseite des Auges.«

Felix schüttelte den Kopf. »Ganz so einfach kann es aber nicht sein. So wie du das gezeichnet hast, Julia, wird der obere Gegenstandspunkt in den unteren Bildpunkt abgebildet. Das Bild steht also auf dem Kopf – genau wie vorher bei der Kugelvase. Wir sehen aber mit unseren Augen alle Gegenstände richtig herum. Und zweitens ist das Bild immer deutlich hinter der Vase entstanden. Auf deiner Zeichnung entsteht es aber auf der Innenseite des Augapfels. Ein Auge muss also anders funktionieren!«

»Ich muss zugeben«, sagte Herr Sommer, »dass mir selbst nicht ganz klar gewesen ist, wie im Auge das Bild entsteht. Deshalb habe ich mich gestern Abend in einem großen Lexikon ein wenig schlau gemacht. Zunächst zum ersten Einwand von Felix. Die Außenwelt wird auf der Innenseite des Auges tatsächlich auf dem Kopf stehend abgebildet. Ein Säugling muss erst lernen, sich zurechtzufinden. Dass das gelernt werden muss und nicht angeboren ist, weiß man aus Versuchen mit Erwachsenen, denen man eine Umkehrbrille verpasst hat. Schon nach wenigen Tagen hatten sie sich an die verkehrte Welt gewöhnt. Als man ihnen dann die Brillen wieder abnahm, stand die Welt wieder für eine Weile auf dem Kopf, und es dauerte ein paar Tage, bis sie wieder richtig sehen gelernt hatten. Daran, dass wir etwas sehen, ist also nicht nur das Auge, sondern auch unser Gehirn beteiligt.

Auch der zweite Einwand von Felix ist berechtigt. Der Augapfel besteht überwiegend aus Wasser, und deshalb ist auch die Brechung ganz ähnlich wie an einer Wasserkugel. Mit anderen Worten: Das Bild würde bei einem Aufbau des Auges wie in Julias Zeichnung unscharf sein, weil sich ein scharfes Bild erst hinter dem Auge ergäbe.

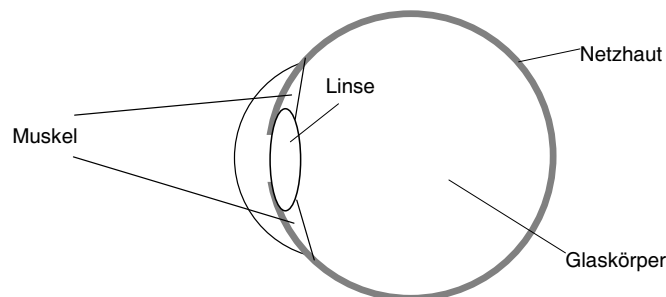
Dieses Problem ist von der Natur sehr elegant gelöst worden. Der vordere Teil des Auges, die so genannte Hornhaut, ist nämlich stärker gekrümmt als der Hauptteil des Augapfels. Das sieht ungefähr so aus:



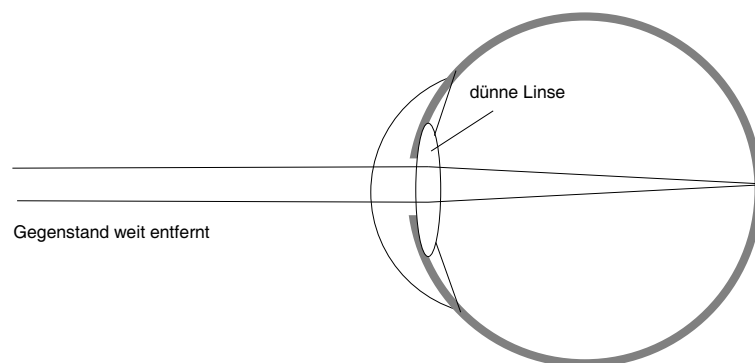
Ich habe hier auch gleich noch die Iris eingezeichnet, das ist die farbige Haut, die bei den meisten Menschen blau oder braun gefärbt ist. Sie hat in der Mitte ein Loch, die so genannte Pupille, durch die das Licht in den hinteren Teil des Auges eintreten kann. Das ganze Gebilde hat ungefähr einen Durchmesser von zweieinhalb Zentimetern.

Dadurch, dass die Hornhaut stärker gekrümmt ist, wird das Licht an ihr stärker gebrochen. Das Licht, das von einem Gegenstandspunkt ausgeht, wird in einem Bildpunkt konzentriert, der genau auf der Innenwand des Auges liegt.

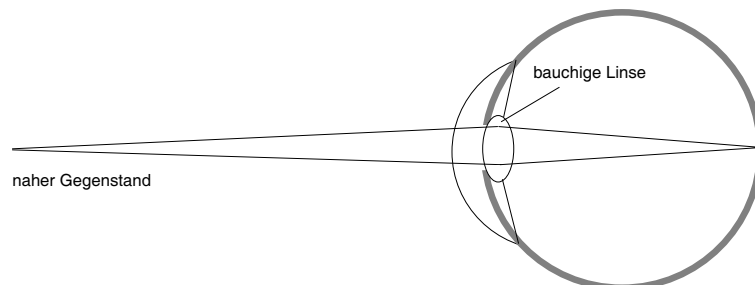
Allerdings könnte man mit einem so konstruierten Auge nur Gegenstände scharf sehen, die sich in einem ganz bestimmten Abstand vor dem Auge befinden. Alles, was weiter weg läge, würde zu stark, alles, was näher läge, nicht stark genug gebrochen. Aber im vorderen Teil des Auges ist noch eine Augenlinse, deren Krümmung mithilfe von Muskeln größer oder kleiner gemacht werden kann. Das sieht dann ungefähr so aus:



Diese Linse, die aus einer gallertartigen Masse besteht, bricht das Licht etwas stärker als die sie umgebenden Teile des Auges. Das Licht wird also nicht nur an der Vorderseite der Hornhaut gebrochen, sondern auch noch an der Vorder- und der Rückseite der Linse. Wollen wir einen weit entfernten Gegenstand scharf sehen, dann ziehen Muskeln die Linse flach.



Ist der fixierte Gegenstand nahe, erschlaffen diese Muskeln mehr oder weniger, sodass die Linse wieder bauchiger wird.



Auf diese Weise können alle Gegenstände, die weiter als ein Mindestabstand vom Auge entfernt sind, von uns scharf gesehen werden.«

»Und warum brauchen dann die meisten Leute so ab fünfzig Jahre eine Lesebrille?«, fragte Niki.

»Mit zunehmendem Alter wird die Linse unelastischer und sie kann sich nicht mehr so bauchig zusammenziehen«, antwortete Herr Sommer. »Bis zu einem Alter von etwa vierzig Jahren hat sich der Mindestabstand von ursprünglich acht Zentimetern bis auf ungefähr zwanzig Zentimeter vergrößert. Sechzigjährige müssen normalerweise einen

Schau mir in die Augen **57**

Gegenstand bereits aus etwa einem Meter Entfernung betrachten, um ihn scharf zu sehen. Sie brauchen deshalb in der Regel eine Lesebrille, weil in einem Meter Entfernung die Buchstaben zu klein sind, als dass sie noch deutlich genug zu erkennen wären. Bei schlechter Beleuchtung fällt es einem zuerst auf. Da brauche ich seit einiger Zeit eine Lesebrille, während ich noch ohne sie auskomme, wenn ich bei Sonnenschein ein Buch lese. Das liegt daran, dass sich im hellen Licht die Pupillen verengen, sodass die Randstrahlen ausgeblendet werden. Und die, das haben wir ja vorhin besprochen, machen das Bild auf der Netzhaut unscharf.«

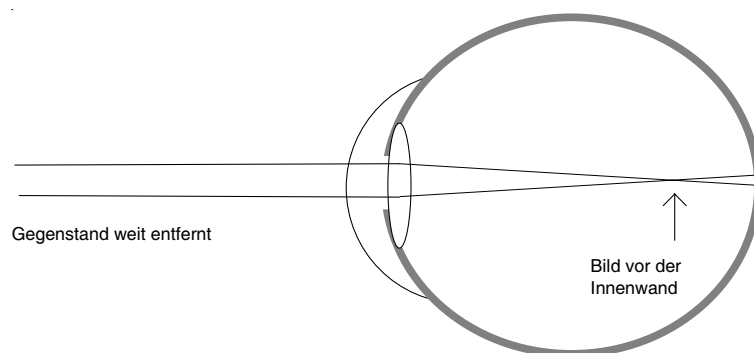
»Dann würden die Buchstaben also schärfer, wenn man die Pupillen zwingen könnte, klein zu werden?«, fragte Julia.

»Leider geht das nicht«, antwortete Herr Sommer, »denn die Größe der Pupille wird von der Lichtmenge gesteuert, die ins Auge fällt, und lässt sich nicht willentlich beeinflussen. Aber mit einer kleinen List kann ich dir dazu verhelfen, auch ganz nahe Gegenstände scharf zu sehen.«

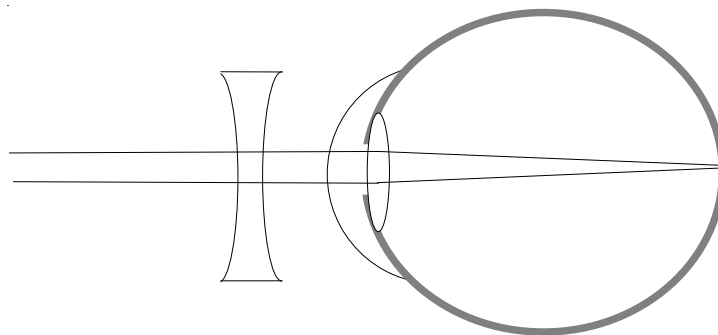
Herr Sommer nahm ein Blatt Papier und piekste mit einer Reißzwecke ein winziges Loch hinein. Als sich Julia diese Öffnung vor die Pupille schob, traute sie ihren Augen nicht: Noch bis zu einem Abstand von fünf Zentimetern blieben die Buchstaben scharf. Als sie die künstliche Pupille wegzog, verschwammen sie zu einem unleserlichen Schriftbild.

»Und warum muss ich eine Brille tragen?«, fragte Felix.

»Weil du kurzsichtig bist«, antwortete Herr Sommer. »Das bedeutet, dass du Gegenstände nur dann scharf siehst, wenn du sie ganz nahe vor dein Auge hältst. Das Bild eines weiter entfernten Gegenstandes entsteht bereits vor der Innenwand deines Auges, weil dein Augapfel etwas größer ist, als es der Brechkraft deines Auges entspricht. Ungefähr so:



Deshalb musst du eine Brille tragen, die die zu starke Brechung des Lichtes an deinem Auge reduziert. Und das ist nun eine ganz andere Art von Linse. Die ist in der Mitte dünner als am Rand.«



»Und wie haben Sie erkannt, dass ich kurzsichtig bin? Es gibt in meinem Alter doch auch weitsichtige Menschen.«

»Das ist ganz einfach zu erkennen. Bei Weitsichtigen ist die Brechung des Lichtes am Auge zu gering. Sie müssen deshalb eine Brille tragen, deren Gläser in der Mitte dicker sind. Der Optiker nennt diese Form auch konvex. Alle Linsen, die wir bisher untersucht haben, sind solche Konvexlinsen. Wenn man durch eine solche Linse einen Gegenstand betrachtet, erscheint dieser vergrößert. Das Auge eines Weitsichtigen sieht deshalb mehr oder weniger vergrößert aus. Und bei Kurzsichtigen ist es gerade umgekehrt. Sie müssen Brillen tragen, deren Linsen am Rande dicker sind als in der Mitte, der Optiker nennt sie Konkavlinsen. Deshalb erscheint mir dein Auge hinter der Brille etwas verkleinert.«

Bildverarbeitung im Gehirn

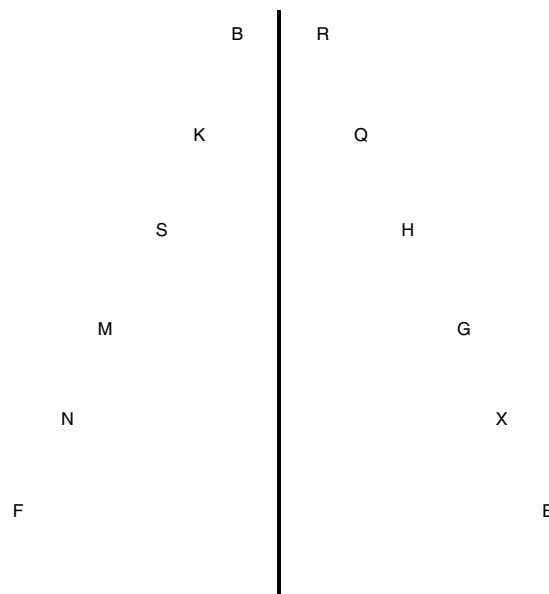
»Gut, jetzt wissen wir also, wie auf der Innenseite des Auges ein scharfes Bild zustande kommt«, sagte Anne. »Aber wie geht es dann weiter? Sie haben doch vorhin gesagt, dass unser Gehirn am Sehen beteiligt ist. Wie erfährt also unser Gehirn etwas von dem Bild?«

»Die Innenseite des Auges ist mit einer Haut ausgekleidet, die von kleinen Adern netzartig durchzogen ist«, antwortete Herr Sommer. »Man nennt sie deshalb auch die Netzhaut. Eingebettet in diese Netzhaut sind lichtempfindliche Zellen. Werden sie vom Licht getroffen, so senden sie über eine Nervenfaser einen elektrischen Impuls an das Sehzentrum des Gehirns. Das Muster dieser elektrischen Impulse verarbeitet dann unser Gehirn zu dem Sinneseindruck, den wir von der Außenwelt haben. Das ist ein sehr komplizierter Vorgang, der auch von den Fachleuten noch nicht in allen Einzelheiten verstanden wird.

Besonders viele Sehzellen sitzen im Zentrum der Netzhaut, dem so genannten Gelben Fleck. Wir sehen deshalb die Gegenstände der Au-

ßenwelt, die an dieser Stelle der Netzhaut abgebildet werden, besonders scharf, und alles andere mehr oder weniger verschwommen. Das kann ich euch mit einem ganz einfachen Versuch zeigen.«

Herr Sommer ging zur Tafel und zeichnete einen senkrechten Strich. Rechts und links davon schrieb er in immer größer werdenden Abständen von der senkrechten Linie Buchstaben.



»Schaut jetzt einmal genau auf die Linie und versucht die Buchstaben rechts und links von der Linie zu lesen, ohne sie direkt anzublicken.«

»Also, das ist gar nicht so einfach«, sagte Anne. »Ich erwische mich immer wieder dabei, wie ich ganz schnell mal nach rechts, mal nach links schiele. Aber ich glaube, die beiden unteren Buchstabenpaare könnte ich, ohne zu mogeln, nicht mehr entziffern. Da seh ich zwar, dass da noch etwas ist, aber es ist zu verschwommen, als dass ich es lesen könnte. Liegt das daran, dass die Netzhaut nach außen hin immer weniger Sehzellen hat?«

»Ja, genau das ist der Grund, und nicht etwa, weil die Bilder auf der Netzhaut nach außen hin zu unscharf würden«, antwortete Herr Sommer. »Wenn der Abstand der Sehzellen größer wird als die Details in dem Bild eines Buchstabens, können wir die einzelnen Buchstaben eben nicht mehr sicher unterscheiden.«

»Aber wie kommt es«, fragte Anne, »dass ich davon sonst überhaupt nichts merke? Wenn ich z. B. aus dem Fenster schaue, sehe ich doch

alles scharf und nicht nur den Schornstein oder eines der Fenster oder die Hausnummer.«

»Na, dann schau mal zum Fenster hinaus, und ihr anderen betrachtet Annes Augen. Was fällt euch da auf?«

»Die halten ja keine Sekunde still«, sagte Julia überrascht. »Du bewegst andauernd beide Augäpfel, beide gleichzeitig und mehr oder weniger ruckartig. Und jetzt bewegst du auch noch den Kopf. Du schaust dauernd irgendwo anders hin, Anne.«

»Ich will ja auch alles sehen, was draußen los ist, und nicht nur etwas ganz Spezielles. Moment mal. Jetzt schau ich nur auf die Hausnummer. Die sehe ich ganz scharf, aber alles, was etwas weiter davon entfernt ist, sehe ich nur undeutlich.«

»Und jetzt blickst du ganz starr geradeaus. Bewege einmal deinen Kopf hin und her, aber gucke weiter auf die Hausnummer ... aha, jetzt sind Iris und Pupille einmal im linken und dann wieder im rechten Augenwinkel, sodass dein Blick immer geradeaus gerichtet bleibt.«

»Das läuft wohl alles ganz automatisch ab«, meinte Felix. »Mir war es gar nicht bewusst, dass wir mit den Augen so hin- und herwandern. Wenn wir dann etwas sehen, das wir genauer betrachten wollen, halten wir das Auge an und starren dorthin.«

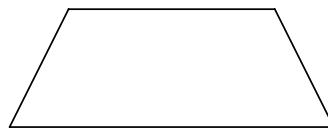
»Und dass wir beim Schauen den Eindruck haben, alles gleichzeitig scharf zu sehen«, sagte Herr Sommer, »liegt daran, dass unser Gehirn in der Lage ist, einmal erkannte Objekte für kurze Zeit im Gedächtnis zu behalten, auch dann, wenn sie durch Bewegung des Augapfels nicht mehr im Zentrum des Gesichtsfeldes sind. Die Bildentstehung auf der Netzhaut ist zwar vergleichbar mit der Bildentstehung auf dem Film eines Fotoapparats, aber die Bildverarbeitung ist eben grundverschieden.«

»Es soll doch aber Leute geben, die ein fotografisches Gedächtnis haben«, wandte Julia ein. »Ich habe einmal gelesen, dass Mozart nur einen kurzen Blick auf ein Notenblatt zu werfen brauchte, um die Komposition dann auswendig spielen zu können. Der hat doch sicher so eine Art inneres Bild von dem Notenblatt gehabt, von dem er die Noten ablesen konnte.«

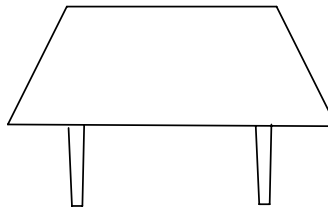
»Ja und nein«, antwortete Herr Sommer. »Sicher hat er ein inneres Bild von dem Musikstück gehabt, aber bestimmt keines, von dem er jede einzelne Note des Musikstücks ›ablesen‹ konnte. Übrigens war er zu der gleichen Leistung fähig, wenn er ein Musikstück nur hörte. Dann konnte er sich ans Klavier setzen und es fehlerfrei nachspielen. Hätte man ihm ein Notenblatt vorgelegt oder ein Stück vorgespielt, bei dem die einzelnen Töne ganz beliebig aneinander gereiht gewesen wären, hätte er mit Sicherheit passen müssen. Ein ordentlich komponiertes Musikstück folgt nämlich bestimmten Regeln. Die Töne sind z. B. einer

bestimmten Tonleiter entnommen, und ihre Abfolge ist nicht willkürlich, sondern es werden bestimmte Wendungen bevorzugt. Mozart hat also nicht die einzelnen Töne in seinem Gedächtnis gespeichert, sondern er hat die Regeln erkannt, nach denen ein Musikstück komponiert worden ist. Aber auch das Gehirn von uns Normalbegabten ist zu außerordentlichen Leistungen fähig, wenn es darum geht, das Gesehene zu deuten.«

Herr Sommer ging zur Tafel und zeichnete folgende Figur:



Das könnte vieles bedeuten: eine abgestumpfte Pyramide, ein Dach oder vielleicht ein Sargdeckel. Als er an die Figur noch zwei Beine zeichnete:



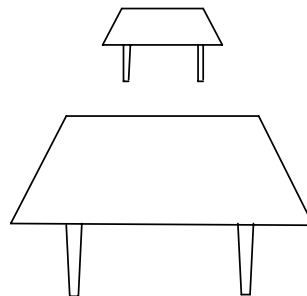
... war sie schon weniger vieldeutig.

»Das soll wohl ein Tisch sein?«, fragte Anne.

»Woran hast du denn erkannt, dass ich einen Tisch zeichnen wollte?«

»Nun ja, an den Beinen. Normalerweise hat ein Tisch natürlich vier Beine, aber die beiden hinteren sind von der Tischplatte verdeckt, weil der Tisch so gezeichnet ist, als ob ich schräg von oben draufsehe.«

»Und was könnte das sein?«



»Jetzt sind es zwei Tische, einer vorne und einer weiter hinten. Es könnten Tische in einem Restaurant sein, die so hintereinander aufgestellt sind.«

»Zwei gleiche Tische?«

»Ja, würde ich sagen.«

»Und welche Form haben die Tischplatten?«

»Rechteckig natürlich.«

»Aber auf meiner Zeichnung sind sie doch gar nicht rechteckig.«

»Stimmt! Das fällt mir jetzt erst auf. Aber es sieht so aus, als ob es ganz normale rechteckige Tische wären.«

»Setz dich einmal hier an die Schmalseite des Tisches, Anne, und beschreibe, wie du die Tischkanten siehst.«

Anne setzte sich an den Tisch und kniff ein Auge zu. »Also, die hintere und die vordere Kante verlaufen genau waagrecht. Und die beiden seitlichen Kanten verlaufen von vorne nach hinten, genau senkrecht.«

»Bist du sicher?«

»Wie soll es denn anders sein?«

Herr Sommer gab Anne einen Bleistift in jede Hand und bat sie, diese mit ausgestreckten Armen so vor sich zu halten, dass sie die seitlichen Tischkanten zudeckten.

»Ich muss die Bleistifte ja total schief halten«, rief sie verwundert. »Jetzt sehe ich erst, dass die Tischkanten nach hinten aufeinander zulaufen.«

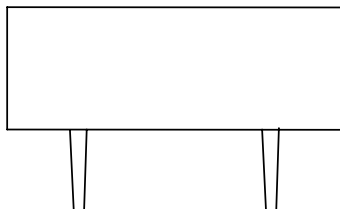
»Kannst du dir denken, warum das so ist?«

»Keine Ahnung! Was meint ihr denn?«

Jetzt setzte sich Julia auf den Stuhl an der Schmalseite des Tisches und peilte abwechselnd die vordere und die hintere Tischkante an. »Die hintere Kante ist ja viel kürzer als die vordere«, sagte sie schließlich. »Natürlich, das muss so sein, denn die ist ja weiter weg und deshalb erscheint sie mir kürzer. Und wenn man das beim Zeichnen nicht berücksichtigt, dann sieht es irgendwie falsch aus. Kein Wunder, wenn die Dinge auf meinen Zeichnungen manchmal ein wenig verzerrt aussehen.«

»Die meisten Leute tun sich mit solchen perspektivischen Zeichnungen schwer«, tröstete sie Herr Sommer. »Wahrscheinlich liegt das daran, dass sie zu sehr mit dem Verstand zeichnen und meinen, sie wüssten schon, wie die Linien zu ziehen sind. Klar doch, sagen sie sich vielleicht, eine Tischplatte ist rechteckig. Und dann zeichnen sie auch ein Rechteck und wundern sich, dass es irgendwie falsch aussieht.«

Dabei müssten sie nur genau hinschauen und nur das zeichnen, was sie sehen. Und wenn ihr einmal im Zweifel seid, wie eine Linie verläuft, braucht ihr nur den Bleistifttrick anzuwenden, und schon ist alles klar.«



Felix betrachtete noch einmal die perspektivische Zeichnung der beiden Tische. »Obwohl Sie den einen viel kleiner als den anderen gezeichnet haben, habe ich den Eindruck, dass beide gleich groß sind. Ist das nicht merkwürdig?«

»Sehen ist eben mehr, als dass etwas auf der Netzhaut abgebildet wird«, antwortete Herr Sommer. »Das Gesehene wird von unserem Gehirn gedeutet und dabei wird ein Gegenstand trotz aller perspektivischen Verzerrung in seiner Form erkannt und in seiner Größe richtig eingeschätzt. Ich nehme an, dass diese Leistung für das Überleben von großer Bedeutung war und natürlich auch heute noch ist. Stellt euch vor, ein Steinzeitkind hätte diese Fähigkeit nicht gehabt. Dann würde es sich möglicherweise vor einem Kätzchen in seiner unmittelbaren Nähe gefürchtet haben, weil dessen Krallen so groß sind, aber sich vor einem ausgewachsenen Löwen in zwanzig Meter Entfernung nicht in Sicherheit gebracht haben, weil er ja scheinbar viel kleiner als das Kätzchen ist.«

Tieraugen

Frau Sommer brachte einen Krug mit gekühltem Fruchtsaft herein. »Das wollte ich Sie schon immer einmal fragen«, wandte sich Anne unvermittelt an sie, »stimmt es eigentlich, dass Pferde im Dunkeln besser sehen als wir? Ich bin neulich in der Dämmerung zu den beiden Pferden auf der Koppel hinter unserem Haus gegangen. Es war schon so dunkel, dass ich sie gar nicht sehen konnte. Aber die beiden kamen nach einer Weile angetrabt und wollten etwas zu fressen haben.«

»Pferde sehen nicht nur besser im Dunklen, sie sehen auch anders«, antwortete Frau Sommer. »Ihre Augen sind seitlich am Kopf und erlauben fast einen Rundumblick. Damit sind sie in der Lage, den ganzen Horizont ›im Auge zu behalten‹ und vor einem Feind wegzurennen zu können. Nur was unmittelbar hinter ihnen und vor ihrem Kopf ist, können sie nicht sehen.

Ganz anders im Kopf platziert sind Raubtieraugen. Bei Katzen oder auch bei Raubvögeln sind sie nach vorne auf die Beutetiere gerichtet.

Das hat den zusätzlichen Vorteil, dass eine solche Augenstellung räumliches Sehen unterstützt. Weil nämlich jedes Auge die anvisierte Beute – z. B. eine Maus – unter einem etwas anderen Winkel sieht, sind die Bilder, die vom linken und vom rechten Auge an das Sehzentrum übermittelt werden, ein wenig verschieden. Das Sehzentrum macht dann aus dieser Verschiedenheit eine Information über die Entfernung der Maus.«

»Kann denn ein Pferd überhaupt nicht räumlich sehen?«, fragte Anne.
»Denn wenn ich z. B. neben einem Pferd stehe, sieht es mich ja nur mit einem Auge.«

»Ich nehme an, dass ein Pferd Entfernungen zur Seite hin so gut oder so schlecht abschätzen kann wie du, wenn du dir ein Auge zuhältst. Dann orientierst du dich vor allem daran, wie groß dir ein Gegenstand erscheint. Pferde sind aber in der Lage, ihre Augen bis zu einem gewissen Grad nach vorne zu richten. Sie sehen dann alles, was weiter als etwa zwei Meter entfernt ist, mit beiden Augen und können so die Entfernung abschätzen. Das ist z. B. wichtig, wenn sie über Hindernisse springen. Allerdings verschwindet das Hindernis nach dem Absprung aus ihrem Gesichtsfeld, sodass sie gewissermaßen blind drüberfliegen. Auch die Stelle, an der sie landen, können sie nicht sehen, und deshalb gehen Pferde, sofern sie die Wahl haben, lieber um ein Hindernis herum als darüber zu springen. Ihre Vorsicht überwinden sie nur, wenn sie in Panik vor einem tatsächlichen oder vermeintlichen Feind davonrennen oder wenn sie volles Vertrauen zum Reiter haben.«

»Und wie kann man sich erklären, dass Pferde in der Dunkelheit so gut sehen?«, fragte Anne.

»Pferdeaugen haben hinter der Netzhaut eine spezielle Haut, die das Licht reflektiert. Auf diese Weise hat das ins Auge gefallene Licht zweimal Gelegenheit, die Sehzellen zu reizen. Das haben Pferde übrigens mit Tieren gemeinsam, die hauptsächlich während der Nacht aktiv sind, z. B. mit Katzen.«

»Ich habe immer gedacht«, sagte Julia, »dass Katzen im Dunkeln deshalb so gut sehen, weil ihre Augen leuchten. Das habe ich nämlich schon oft beobachtet. Bei Nacht glühen Katzenaugen wie zwei Lämpchen.«

»Ja, das sieht tatsächlich so aus. Aber was du da gesehen hast, ist nur das am Augenhintergrund reflektierte Licht, das von einer äußeren Lichtquelle ins Augennere gefallen ist. In einem stockfinsternen Zimmer wirst du in den Katzenaugen kein Leuchten sehen.«

Regenbogenfarben

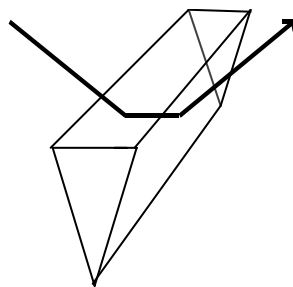
Am nächsten Morgen führte Herr Sommer seine Gäste in ein nach Osten liegendes Zimmer. Dort hatte er das Mosaik aus seinem Arbeitszimmer so an die Fensterscheibe gehängt, dass die halb durchscheinenden Achatplatten und die metallenen Einfassungen einen Schatten auf den Fußboden warfen. Außer diesem Schatten, über den sich natürlich niemand wunderte, war aber noch etwas anderes zu sehen: Auch auf die bisher nicht von der Sonne beschienene Wand fiel jetzt Licht, aber was für ein Licht! Ein waagrecht liegendes Rechteck glühte in allen Regenbogenfarben. An der unteren Kante leuchtete es rot, darüber war ein Streifen Gelb, dann Grün, dann Blau, und den Abschluss bildete ein Streifen in einem dunklen Violett. Die Farben waren sehr klar und intensiv. Sobald Herr Sommer das Mosaik ein wenig bewegte, wanderte auch das farbige Viereck. Jetzt nahm er einen Bleistift und führte ihn über verschiedene Stellen des Mosaiks. Sobald er den untersten, aus Glas bestehenden Teil abdeckte, verschwand die farbige Erscheinung. Die Farben mussten also etwas mit diesem Stück Glas zu tun haben.

»Ist doch klar«, sagte Niki, »dieses Stück Glas da unten ist ein Prisma, und wenn Licht durch ein Prisma hindurchgeht, entsteht ein Lichtspektrum, das heißt, das Licht wird in einzelne Farben zerlegt.«

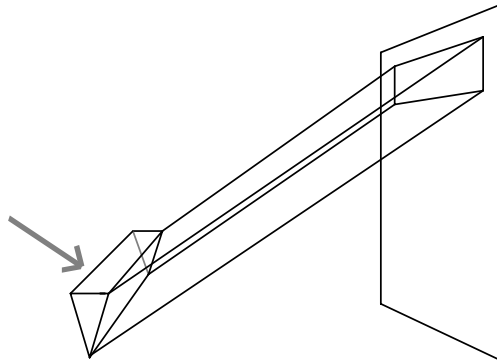
»Gar nichts ist klar!«, rief Anne ärgerlich. »So ein Prisma ist doch auch nur ein Stück Glas, an dem das Licht gebrochen wird. Und nun erklär mir mal, warum wir bisher noch nie Farben bei der Brechung von Licht beobachtet haben.«

»Wie wäre es«, schlug Herr Sommer vor, »wenn uns Niki zunächst einmal aufzeichnen würde, welchen Weg das Sonnenlicht durch das Prisma nimmt.«

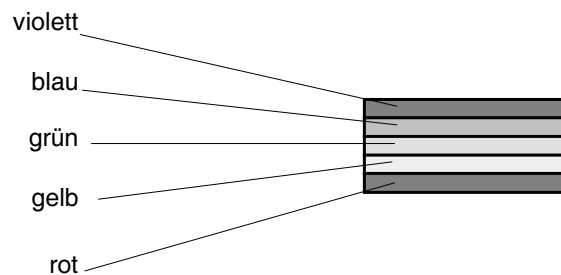
Niki zeichnete zuerst das Glasprisma und dann die Richtungsänderung, die das Licht bei der Brechung an der Vorder- und der Rückseite des Prismas erfährt.



»Das Sonnenlicht wird durch das Prisma schräg nach oben abgelenkt und fällt deshalb auf die Wand. Und weil die Seitenflächen des Prismas Vierecke sind, ist der Lichtfleck an der Wand auch ein Viereck. Ungefähr so:



Und bei einem Prisma ist dieser Lichtfleck eben farbig, etwa so:



Das sind die gleichen Farben wie beim Regenbogen.«

»Ist das hier vielleicht so eine Art Regenbogen, nur eben ohne Regen?«, fragte Anne.

»Beide Erscheinungen haben tatsächlich die gleiche Ursache, nämlich die Lichtbrechung«, antwortete Herr Sommer. »Auch beim Regenbogen wird das Sonnenlicht gebrochen, nicht an einem einzelnen Prisma aus Glas, sondern an einer Unzahl von Regentropfen.«

»Aber bisher haben wir doch bei der Brechung von Licht noch nie solche Regenbogenfarben beobachtet«, meinte Julia.

»Vielleicht ist es ja so«, sagte Herr Sommer, »dass sie auch bisher schon aufgetreten sind, wir sie aber übersehen haben. Es könnte doch sein, dass die Bedingungen für das Beobachten der Regenbogenfarben

an diesem Prisma besonders günstig sind. Probiert doch einmal, ob auf dem Weg zwischen Prisma und Wand überall dieselben Farberscheinungen auftreten.«

»Wie sollen wir das denn machen?«, fragte Anne. »In der Luft sieht man das Licht doch gar nicht!«

»Ihr könntet ja die Wand verschieben!«

»???«

»Anstelle der Wand könntet ihr ein Stück weißes Papier verwenden.«

Auf dem weißen Papier, das nun an die Wand gehalten wurde, waren die Farben noch leuchtender als auf der etwas angegrauten Raufasertapete. Jetzt sah man auch, dass die einzelnen Farbstreifen nicht scharf gegeneinander abgegrenzt waren, sondern dass sich die einzelnen Farbtöne sanft aneinander schmiegt und durch Zwischentöne miteinander verbunden waren. So lagen zwischen Rot und Gelb verschiedene Schattierungen von Orange und zwischen Grün und Blau unterschiedliche Blau-grün-Abstufungen.

Bewegte man das Papier auf das Prisma zu, änderte sich die Farberscheinung. Das Grün in der Mitte wurde nach und nach blasser und verschwand schließlich ganz zugunsten von Weiß. Dann wurden auch das angrenzende Gelb und Blau von der weißen Mitte verschluckt und unmittelbar hinter dem Prisma blieben nur die zwei äußersten Streifen Rot und Violett übrig. Die waren aber so unscheinbar schmal, dass man sie hätte leicht übersehen können, wäre man durch das zuvor Gesehene nicht vorbereitet gewesen.

»Es sieht so aus«, sagte Julia, »als ob die Farben erst hinter dem Prisma allmählich entstehen. Und das könnte auch der Grund sein, warum wir sie bisher immer übersehen haben; wir haben einfach den Lichtweg nach der Brechung nicht lange genug verfolgt!«

»Das kann aber nicht stimmen«, protestierte Anne. »Erinnerst du dich noch an das umgekehrte Bauernhaus an der Wand? Da war vorne am Fenster die Linse und das Bild weit weg hinten an der Wand und da haben wir diese Regenbogenfarben nicht gesehen.«

»Wenn ihr ganz genau hingeschaut hättet, wären sie auch dabei zu sehen gewesen«, sagte Herr Sommer. »Die Umrisse des Schornsteins gegen den hellen Himmel z. B. waren nicht nur ein wenig unscharf, sondern hatten auch einen schmalen farbigen Saum. Aber wir haben nicht weiter darauf geachtet. Dass hier die Farben so viel deutlicher zum Vorschein kommen, liegt daran, dass die Brechung an diesem Prisma im Vergleich zu der an der dünnen Linse sehr viel stärker ist.«

»Aber woher kommen denn diese Farben überhaupt?«, fragte Felix. »Alles, was wir wissen, ist doch, dass sie bei der Brechung von Licht auftreten.«

»Da muss ich eine kleine Einschränkung machen«, antwortete Herr Sommer. »Wir wissen lediglich, dass die Regenbogenfarben bei der Brechung von Sonnenlicht auftreten. Auch bei anderen Lichtquellen, die weißes Licht aussenden, ist es so. Macht man denselben Versuch aber mit rotem Licht, so bleibt es immer nur rotes Licht, so oft man es auch an Prismen oder Linsen bricht, und blaues Licht bleibt immer blaues Licht. Und das könnte euch vielleicht auf die richtige Spur bringen.«

»Also, wenn ich Sie recht verstanden habe«, sagte Julia, »kann nur aus weißem Licht farbiges Licht werden. Wir haben aber gesehen, dass das am Prisma gebrochene Licht ganz dicht hinter dem Prisma ebenfalls weiß ist, bis auf einen winzigen farbigen Saum. Und dass dieser farbige Rand allmählich immer breiter und bunter wird, wenn wir das gebrochene Licht weiter weg vom Prisma auf dem Papier auffangen. Das heißt aber doch, dass die Farben gar nicht bei der Brechung selbst erzeugt werden, sondern dass mit dem weißen Licht irgendetwas geschieht, sodass wir die Farben in einiger Entfernung vom Prisma sehen können.«

»Da bist du genau auf der richtigen Fährte, Julia«, sagte Herr Sommer. »Jetzt musst du diesen Gedanken, dass die Farben vom Prisma gar nicht erzeugt werden, nur weiterspinnen.«

»Sie meinen«, fuhr Julia fort, »die Farben sind vorher schon drin? Weißes Licht ist nichts anderes als rotes und gelbes und grünes Licht und so weiter?«

»Genau das meine ich. Bei unserem jetzigen Kenntnisstand ist das natürlich nur eine Vermutung. Aber versuche einmal, diese Idee zu Ende zu denken. Du wirst sehen, dass sich damit alle Erscheinungen gut erklären lassen.«

»Also gut. So verrückt es auch klingt, wir nehmen einmal an, dass weißes Licht aus Licht in allen Regenbogenfarben besteht. Dieses Licht fällt also nun auf das Prisma, wird dabei zuerst an der Vorderseite gebrochen und kommt nach nochmaliger Brechung auf der Rückseite als weißes Licht wieder raus. Wieso erklärt das was?«

»Jetzt musst du natürlich eine zusätzliche Annahme machen, die dafür sorgt, dass sich die verschiedenen Farben bei der Brechung irgendwie anders verhalten.«

Julia überlegte eine Weile. »Das rote Licht könnte z. B. etwas anders gebrochen werden als das blaue, meinen Sie das? – Natürlich, so was in der Art muss es sein. Denn wenn die Brechung für die einzelnen Farben des weißen Lichts unterschiedlich ausfällt, dann geht jede Farbe hinter dem Prisma ihren eigenen Weg. Zuerst sind alle Farben noch nahe beisammen, und deshalb sehen wir hinter dem Prisma das gebrochene Licht noch als weißes Licht. Aber mit wachsendem Abstand trennen sich

ihre Wege immer mehr, bis sich schließlich die einzelnen Farben überhaupt nicht mehr überdecken. Und dann sehen wir eben die Farben hübsch nebeneinander. Versteht ihr, was ich meine?»

»Das ist zwar eine Erklärung für diese Lichterscheinung«, sagte Felix nach einer kleinen Pause, »doch woher sollen wir wissen, dass es auch die richtige Erklärung ist? Die Annahme, dass weißes Licht eigentlich gar nicht weiß ist, sondern aus Licht der verschiedensten Farben besteht, leuchtet mir z. B. überhaupt nicht ein. Wie kann denn etwas gleichzeitig weiß und vielfarbig sein?»

»Wenn man nur diesen Versuch kennen würde«, antwortete Herr Sommer, »wäre diese Deutung geradezu abenteuerlich. Es hat in der Vergangenheit auch nicht an ganz anderen Deutungen gefehlt, die die hier auftretenden Farberscheinungen erklären können. Die heutigen Physiker zweifeln aber nicht mehr daran, dass die auf den großen englischen Naturforscher Newton zurückgehende Annahme am besten die vielen anderen Lichterscheinungen, die man heute kennt, erklärt: Im weißen Licht sind die Spektralfarben enthalten und bei der Lichtbrechung werden sie unterschiedlich stark gebrochen.«

Gelb und Blau gibt Weiß – oder Grün? Additive und subtraktive Farbmischung

»Doch nun zu der Schwierigkeit, die ihr damit habt, dass Licht nicht gleichzeitig weiß und vielfarbig sein kann«, fuhr Herr Sommer fort. »Ihr erinnert euch sicher, dass wir schon einmal darauf gestoßen sind, dass das, was wir sehen, eine Leistung unseres Gehirns ist. Wenn also das Licht von der Sonne auf einen Bogen Schreibmaschinenpapier fällt und von dort in unser Auge gelangt und unsere Netzhaut reizt, dann müssten wir korrekterweise sagen, dass uns unser Sehorgan und unser Gehirn das als weißes Blatt Papier erscheinen lässt. Aber wir können nicht ausschließen, dass das, was das Papier an Licht aussendet, und das, was unser Gehirn daraus macht, etwas Grundverschiedenes ist. Darüber weiß man mehr, seit die Vorgänge in der Netzhaut besser erforscht sind.

Wir haben nämlich zwei verschiedene Arten von Sehzellen, die ihrer äußeren Form wegen Stäbchen und Zäpfchen genannt werden. Die Stäbchen registrieren nur die Helligkeit, nicht aber die Farbe eines Gegenstands. Sie sind für das Sehen bei spärlicher Beleuchtung zuständig. Ihr habt sicher schon einmal bemerkt, dass wir bei abnehmender Helligkeit immer weniger Farben sehen und unterscheiden können. Bei Nacht sind eben alle Katzen grau – auch die tigerfarbenen.

Die Zäpfchen sind für das Farbsehen zuständig. Schon lange vor ihrer Entdeckung stellte der englische Physiker und Arzt Thomas Young zu Beginn des 19. Jahrhunderts eine Theorie des Farbsehens auf. Young hatte farbiges Licht auf eine weiße Wand geworfen und dabei herausgefunden, dass er jede beliebige Farbnuance durch Überlagerung von nur drei Grundfarben, nämlich Rot, Grün und Blau, erzielen konnte. Nahm er z. B. rotes und grünes Licht, dann entstand beim Betrachter der Farbeindruck Gelb. Aus Rot und Blau wurde Purpur, aus Grün und Blau ein blaues Grün. Durch Änderung der Helligkeiten der an der Überlagerung beteiligten Farben ließen sich beliebige Zwischentöne erzeugen. Das Überraschendste aber war das Folgende: Wenn er aus Rot und Grün einen gelben Farbeindruck erzeugt hatte und nun noch die dritte Grundfarbe, nämlich Blau, hinzufügte, hatte er den Farbeindruck Weiß!

Daraus schloss er, dass es drei unterschiedliche Arten von Sehzellen geben müsse, von denen eine Art für rotes, die zweite für grünes und die dritte für blaues Licht empfindlich sein müsse. Geht von einem Gegenstand gelbes Licht aus, dann werden die »roten« und die »grünen« Zäpfchen gereizt und von unserem Gehirn als Gelb gedeutet. Weißes Licht reizt dagegen alle drei Arten von Zäpfchen: Wir sehen Weiß.

Youngs Theorie blieb lange Zeit unbeachtet und erst 1964 fand man in der Netzhaut tatsächlich genau drei verschiedene, für die Farben Rot, Grün und Blau empfindliche Zäpfchen. Die an der Entdeckung beteiligten amerikanischen Wissenschaftler bekamen dafür 1967 den Nobelpreis für Medizin.«

»Das mag ja alles so sein oder auch nicht«, sagte Anne. »Ich habe da ganz andere Erfahrungen mit Farben gemacht. Wenn ich in meinem Tuschkasten Rot und Grün mische, bekomme ich nämlich kein Gelb, sondern eine braune Soße. Und wenn ich zu gelber Farbe noch Blau dazurühre, erhalte ich ganz bestimmt Grün, aber doch nie und nimmer Weiß. Weiß ist doch eine extra Tube Farbe in meinem Malkasten. Die kriege ich doch nicht durch Mischen von anderen Farben! Also irgendwas kann da nicht stimmen.«

»Das muss kein Widerspruch sein«, antwortete Herr Sommer. »Die Mischung von Farben, wie du sie beschreibst, ist nämlich nicht mit der Überlagerung von farbigem Licht, so wie Young das gemacht hat, vergleichbar. Das kann ich euch in einem einfachen Versuch zeigen.«

Sie gingen wieder in das Arbeitszimmer zurück und Herr Sommer nahm einen würfelförmigen Karton mit der Aufschrift »Musikkreisel – da werden Kinderträume wahr« vom Regal. Er nahm den Kreisel heraus, stülpte über dessen Hals eine weiße, runde Pappscheibe, in die er ein passendes Loch geschnitten hatte, und versetzte ihn durch mehrmaliges Niederdrücken und wieder Hochziehen einer Spindel in schnelle

Gelb und Blau gibt Weiß – oder Grün? Additive und subtraktive Farbmischung **71**

Umdrehung. Der Kreisel summt angenehm vor sich hin und kam erst nach längerer Zeit ins Trudeln, bis er schließlich umkippte. Die weiße Scheibe, die die Umdrehung mitmachte, blieb natürlich weiß. Nun schnitt er aus farbiger Klebefolie Kreise aus, machte daraus Viertelkreise und klebte diese so auf die weiße Pappscheibe, dass sich je zwei gleiche Farben gegenüberstanden.

Zuerst schob er eine rot-grüne Scheibe über den Hals des Kreisels und ließ ihn erneut summen. Die Umdrehung der Scheibe war so schnell, dass man die Bewegung der Viertelkreise nicht mehr verfolgen konnte. Die einzelnen Farbsegmente verschmolzen zu einer einzigen farbigen Kreisfläche, und die war eindeutig weder rot noch grün, sondern gelblich.

Jetzt wiederholte Herr Sommer den Versuch mit einer blau-gelben Scheibe. Sie wurde bei schneller Drehung zu einem hellen Grau. Anne wollte darin unbedingt einen grünlichen Schimmer sehen und war erst zufrieden, als Herr Sommer ein Stück gelber und blauer Folie übereinander legte und gegen das helle Fenster hielt. Ja, das war Grün! Ein richtig sattes Grün, nicht nur so ein blasser, womöglich nur eingebildeter Schimmer von Grün!

»Gut, ich sehe es ein«, sagte Anne schließlich. »Einmal wird aus Blau und Gelb ein – sagen wir mal – etwas angegrautes Weiß und das andere Mal wird aus Blau und Gelb ein sattes Grün. Aber warum ist das denn so?«

»Versuch doch zuerst einmal zu erklären, woran es liegen könnte, dass dir die eine Folie gelb und die andere blau erscheint«, schlug Herr Sommer vor. »Beide Folien werden ja von weißem Licht beleuchtet.«

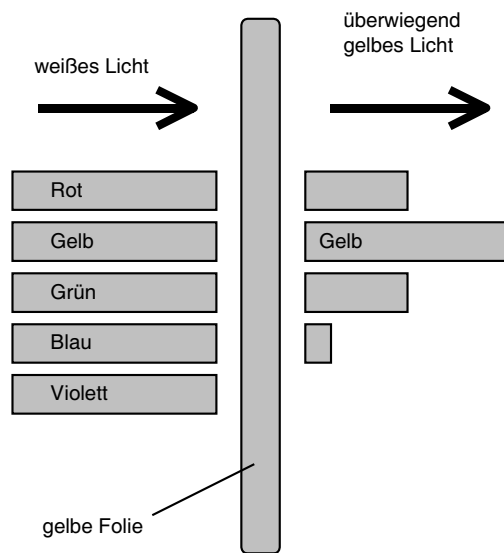
Anne blickte ihn verständnislos an. »Was gibt es da viel zu erklären? Die Welt ist halt bunt, eine Zitrone ist gelb und Bluejeans sind eben blau!«

»Könnte es sein«, fragte Julia nach einer Weile, »dass die gelbe Folie gelb aussieht, weil sie alle Farben außer Gelb verschluckt?«

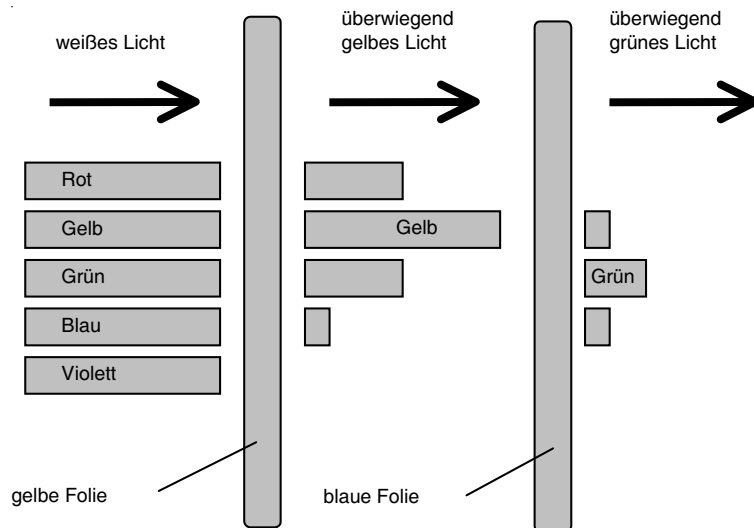
»Genau so ist es oder – um ganz korrekt zu sein – neben Gelb wird auch noch etwas Grün und Rot durchgelassen, ganz wenig Blau und so gut wie kein Violett. Der Farbeindruck ist aber eindeutig Gelb, weil das Gelb fast ungeschoren durch die Folie hindurchgeht. So, nun müsstet ihr eigentlich in der Lage sein zu erklären, warum uns die blaue Folie, über die gelbe gelegt, grün erschienen ist. Julia wie wär's? Du könntest vielleicht eine Zeichnung machen.«

Julia ging zur Tafel. »Das weiße Licht kommt von links.

Da sind noch alle Farben drin, deshalb sehen wir es ja als weiß. Und hier rechts überwiegt dann das Gelb, weil das andersfarbige Licht teilweise von der Folie verschluckt worden ist.



Jetzt muss ich überlegen, was mit diesem »gelben« Licht passiert, wenn es durch die blaue Folie geht. Da wird es wohl so sein, dass die blaue Folie hauptsächlich das blaue Licht durchlässt und das andersfarbige Licht mehr oder weniger verschluckt. Also vielleicht so:



Gelb und Blau gibt Weiß – oder Grün? Additive und subtraktive Farbmischung **73**

Gelb wird kräftig verschluckt, Grün nur mäßig und Blau so gut wie gar nicht. Das würde aber bedeuten, dass hinter dem Blaufilter jetzt das grüne Licht überwiegt. Und deshalb sehen die beiden Folien, hintereinander gelegt, grün aus. Ja, so könnte es erklärt werden.«

»Und das ist auch die Erklärung dafür«, ergänzte Herr Sommer, »dass Grün entsteht, wenn wir die Farben Blau und Gelb aus einem Tuschkasten miteinander mischen. Diese Farben bestehen aus kleinen Farbpartikeln, die je für sich überwiegend Blau bzw. Gelb reflektieren. Mischt man die beiden Farben und trägt sie mit dem Pinsel auf weißes Papier auf, so liegen gewissermaßen viele gelbe und blaue Farbschichten übereinander. Fällt jetzt weißes Licht darauf, dringt es in diese Farbschichten ein, wird an dem weißen Papieruntergrund reflektiert und tritt die Rückreise in Richtung auf unser Auge an. Beim Durchgang durch die aufgetragene Farbe verliert es dabei nach und nach alle Farbanteile außer Grün, weil nur Grün weder von den gelben noch von den blauen Farbpartikeln ganz verschluckt wird.

Es gibt also zwei Arten, Farben zu mischen. Bei unserem Versuch mit dem Kreisel haben sich das Licht von der blauen und das Licht von der gelben Klebefolie addiert und in unserem Auge zu dem Eindruck »Weiß« geführt. Man spricht deshalb auch von einer additiven Farbmischung. Dass das »Weiß« auf dem rotierenden Kreisel nicht so ganz weiß, sondern eher grau war, liegt daran, dass die aufgeklebte blaue und gelbe Folie einen großen Teil des Sonnenlichts verschluckt und nur den blauen bzw. gelben Anteil reflektiert. Im Vergleich mit der Reflexion von einem »weißen« Bogen Papier fällt also weniger Licht in unser Auge und unser Gehirn macht daraus »Grau«.

Durch additive Farbmischung kommen auch die Farben beim Fernsehbild zustande. Der Bildschirm eines Farbfernsehgeräts ist nämlich mit vielen kleinen Punkten aus drei verschiedenen Leuchtstoffen bedeckt. Jeweils ein roter, grüner und blauer Leuchtpunkt liegen dabei dicht nebeneinander. Soll z. B. ein Teil des Bildschirms rot erscheinen, dann leuchten dort nur die roten Punkte. Soll ein anderer Teil gelb aussehen, dann leuchten dort die roten und grünen Punkte. Und Weiß wird erzeugt, wenn alle drei Leuchtpunkte gleichzeitig aufleuchten.

»Dass bei einem bunten Fernsehbild farbige Punkte sein müssen, leuchtet mir ja ein«, meinte Anne. »Aber dass ein weißes Bettlaken, das in einem Gruselfilm durch die Szene schwebt, auch aus farbigen Punkten besteht, kann ich eigentlich nicht so recht glauben.«

»Davon kannst du dich aber leicht überzeugen«, sagte Herr Sommer. »Du brauchst dir nur ein Fernsehbild genauer anzuschauen.«

Herr Sommer führte sie ins Wohnzimmer und machte den Fernsehapparat an. Dann schaltete er mithilfe der Fernbedienung auf Tele-

text um, wählte eine möglichst bunte Seite aus und gab Anne eine Lupe.

Anne betrachtete damit zunächst eine rote Stelle auf dem Bildschirm. »Da gibt es nur rote Punkte ... mit schwarzen dazwischen. Und hier die gelbe Schrift. Da sehe ich rote und grüne Flecken. Ah, hier gibt es ja auch eine weiße Stelle. Tatsächlich! Rote, grüne und blaue Punkte, ganz dicht nebeneinander.«

»Für mich sieht das wie ein sehr helles Grau aus«, sagte Julia. »Gibst du mir einmal die Lupe, Anne? Tatsächlich, aus der Nähe ist es überhaupt nicht mehr grau, sondern total bunt.«

»Auch einige Maler haben gegen Ende des 19. Jahrhunderts ihre Bilder nach dieser Methode gemalt«, erläuterte Herr Sommer. »Geht man nahe genug an ein solches Gemälde heran, sieht man, dass es aus vielen kleinen Farbpunkten aus leuchtenden Regenbogenfarben besteht, die erst bei Betrachtung aus größerer Entfernung ineinander schmelzen und Formen und Mischfarben erkennen lassen. Wegen der Zerlegung des Bildes in einzelne Farbpunkte nennt man diese Malrichtung Pointillismus, von point, das bedeutet Punkt im Französischen.

Die meisten Maler mischen aber ihre Farben auf der Palette, bevor sie sie auf die Leinwand oder auf Papier auftragen. Und damit sind wir bei der anderen Methode der Farbmischung. Dabei werden von dem weißen Licht unterschiedliche Farbanteile abgezogen, wenn es auf unterschiedliche Farbpigmente auftrifft. Man nennt dies deshalb auch eine subtraktive Farbmischung. Auch beim Farbdruck und in der Farbfotografie werden alle möglichen Farbtöne durch Übereinanderschichten von nur drei Farben erzeugt, nämlich Gelb, Blaugrün und Purpur. Soll also z. B. ein Teil des Bildes grün erscheinen, so wird auf eine gelbe Farbschicht noch eine blaue Schicht gelegt.«

»Warum hat dann mein Farbkasten mehr als nur diese drei Grundfarben, wenn ich doch damit alle Farbtöne erzeugen kann?«, fragte Anne.

»Im Prinzip könnte man tatsächlich mit diesen drei Farben auskommen, und das Malen damit ist auch eine gute Übung, um das Mischen von Farben zu erlernen. Aber in der Praxis hat es sich bewährt, mit zusätzlichen, bereits fertig gemischten Farben zu malen, erstens, weil es bequemer ist, und zweitens, weil bestimmte Farbtöne nur sehr schwierig zu mischen sind oder leicht ein wenig schmutzig aussehen. So ist es z. B. nahezu unmöglich, ein einigermaßen natürlich aussehendes, strahlendes Himmelblau aus den Grundfarben zu mischen. Die meisten Maler haben deshalb zwischen zehn und zwanzig Farben in ihrem Malkasten, und darunter ist dann oft auch eine Tube Himmelblau.«

Himmelblau – Lichtstreuung

»Warum ist der Himmel überhaupt blau?«, fragte Julia. »Ist Luft vielleicht von Natur aus ein ganz klein wenig blau, so wie die blaue Folie?«

»So ein Quatsch«, unterbrach sie Anne. »Luft ist doch unsichtbar und hat überhaupt keine Farbe!«

»Es könnte doch aber sein, dass Luft nur ein ganz klein wenig blau ist, sodass wir das nur sehen, wenn wir durch ganz viel Luft hindurchschauen. Das wäre dann so ähnlich wie bei dünnem Tee, wenn man ihn von einer großen Glaskanne in ein kleines Teeglas umgießt. Wenn man durch viel Tee hindurchschaut, ist er noch ziemlich kräftig gefärbt, in dem Glas ist er dann aber viel blasser.«

»Ich glaube«, meinte Felix, »die Luft ist doch nicht blau. Sonst müsste nämlich auch die Sonne blau sein, weil ihre Strahlen ja durch die Luft gehen, bevor sie in unsere Augen fallen.«

»Moment mal«, fuhr Julia fort, »das ist ja tatsächlich so, dass die Sonne nicht immer dieselbe Farbe hat. Tagsüber ist sie weiß oder vielleicht ein bisschen gelblich, aber wenn sie tief am Himmel steht, also morgens oder abends, ist sie rötlich. Aber warum und was das mit dem Himmelblau zu tun hat, weiß ich nun auch nicht. Herr Sommer, nun lassen Sie uns doch nicht so zappeln!«

»Nun, ohne die Lufthülle der Erde wäre der Himmel so rabenschwarz, wie ihn die Astronauten im luftleeren Raum sehen. Dass hier auf der Erde tagsüber der Himmel hell ist, verdanken wir dem Umstand, dass Licht doch nicht so ganz unbeeinflusst durch Luft hindurchgeht, wie wir das bisher angenommen haben. Vielmehr wird ein winzig kleiner Teil des Lichts überall dort, wo es durch Luft hindurchgeht, in alle Richtungen geworfen oder, wie Physiker das ausdrücken, gestreut. Beim Durchgang durch wenige Meter Luft wird so wenig Licht gestreut, dass wir das bei irdischen Abmessungen kaum merken. Wenn wir aber in den Himmel blicken, dann kommt von überallher ein bisschen Streulicht, und insgesamt ist das dann so viel Licht, dass uns der Himmel hell erscheint. Insofern ist das Beispiel vom verdünnten Tee, das uns Julia gegeben hat, durchaus zutreffend. Dass uns der Himmel nicht nur hell, sondern auch blau erscheint, liegt daran, dass bei dieser Streuung blaues Licht sehr viel stärker als rotes Licht gestreut wird. Und das beschert uns nicht nur den blauen Himmel, sondern auch das Rot der untergehenden Sonne. Aber das könnt ihr wieder alleine herausfinden.«

»Habe ich das jetzt richtig verstanden?«, begann Felix. »Wenn ein weißer Lichtstrahl durch Luft geht, wird sein blauer Anteil stärker an der Luft gestreut als der rote?«

Als Herr Sommer nickte, fuhr Felix fort: »Dann ist also in dem gestreuten Licht mehr Blau als in dem weißen und deshalb ist der Himmel blau. Wenn aber aus dem Lichtstrahl von der Sonne das Blaue herausgestreut wird, fehlt es ja in dem Licht, das bis zur Erde vordringt und in mein Auge fällt. Und deshalb sieht die Sonnenscheibe ein wenig rötlich aus.«

»Besonders, wenn sie tief am Himmel steht«, ergänzte Julia. »Dann muss das Sonnenlicht ja einen besonders langen Weg durch die Luft hülle zurücklegen und verliert dabei besonders viel von dem blauen Anteil. Ist es so, Herr Sommer?«

»Ausgezeichnet! Ich hätte es nicht besser erklären können. Übrigens kommt auch das Blau der Augen auf diese Weise zustande. Bei Menschen mit blauen Augen sind in dem Gewebe der Iris kleine Partikel eingelagert, die bevorzugt den blauen Anteil des einfallenden weißen Lichts nach allen Seiten hin streuen. Der Teil des blauen Streulichts, der nach vorne aus dem Auge herausgestreut wird, lässt die Iris deshalb blau erscheinen. Auch das Blau mancher Vögel, z. B. die bläuliche Färbung am Kopf von Truthähnen, beruht darauf.«

»Auch das Blau an den Federn von Pfauen?«, fragte Julia.

»Nein, das kommt wieder auf eine ganz andere Weise zustande«, antwortete Herr Sommer. »Es entsteht durch eine ganz dünne, farblose und durchsichtige Schicht auf den Federn. So etwas Ähnliches könnt ihr auch bei Seifenblasen beobachten oder bei Öl, das sich auf Wasser zu einem dünnen Film ausbreitet. Das Zustandekommen dieser Farben hängt mit einer Eigenschaft des Lichts zusammen, auf die wir ein andermal zu sprechen kommen.«

