Experiment des Monats

Eine kleine Betrachtung zur Fischperspektive über die Frage, wie ein Fisch den Angler sieht und die Köderfliege, die dieser nach ihm ausgeworfen hat

Von Jearl Walker

Das Flugangeln mit künstlicher Fliege stellt den Angler vor ein großes Problem: Wohin soll er die Fliege werfen? Nach alter Anglerweisheit am besten an die Stelle genau über dem Fisch. Doch muß er wirklich so zielsicher werfen? Was ist, wenn der Köder einige Zentimeter daneben landet? Wird ihn dann der Fisch überhaupt noch als Fliege wahrnehmen?

Die Patentanwälte Robert Harmon und John Cline aus Chicago, die sich mit den optischen Aspekten der Flugangelei auseinandergesetzt haben, behaupten nein. Sie glauben, daß der Wurf ziemlich genau sitzen muß, weil sonst das Bild, das der Fisch wahrnimmt, durch die Lichtbrechung an der Oberfläche so sehr verzerrt wird, daß die Fliege nicht mehr nach Fliege aussieht.

Licht breitet sich im Vakuum mit einer Geschwindigkeit von 3×10^8 Meter pro Sekunde aus. In jedem durchsichtigen Medium aber ist die gemessene Geschwindigkeit geringer, weil das Licht mit den Molekülen darin in Wechselwirkung tritt. Die Verzögerung während der Passage läßt sich am leichtesten dadurch beschreiben, daß man einfach sagt, das Licht breite sich insgesamt langsamer aus. So wird jeder Substanz ein Brechungsindex zugeordnet, durch den man die im Vakuum gemessene Lichtgeschwindigkeit teilt, um die tatsächliche Lichtgeschwindigkeit in dem betreffenden Medium zu erhalten. Für Wasser liegt er bei 1,331, für Luft knapp über 1. Die Geschwindigkeit ist also in Luft nur wenig, in Wasser aber erheblich geringer als im Vakuum.

Tritt ein Lichtstrahl von oben durch die Wasseroberfläche, so wird er gebrochen, das heißt, er ändert seine Richtung, weil sich seine Geschwindigkeit im Wasser verringert. Ein- und Ausfallswinkel werden dabei – per Konvention – nicht zwischen Strahl und Oberfläche, sondern zwischen Strahl und jeweiligem Lot gemessen (Bild 2).

Angenommen, ein Lichtstrahl fällt unter einem Winkel von 42 Grad zum Einfallslot auf die Wasseroberfläche. Dann wird ein Teil davon unter dem gleichen Winkel reflektiert. Der andere, ins Wasser dringende Teil wird gebrochen, und zwar zum Ausfallslot hin, so daß der Brechungs- oder Ausfallswinkel nur 30 Grad beträgt.

Andere Einfallswinkel ergeben andere Ausfallswinkel. Die mathematische Beziehung zwischen beiden ist in einem nach dem niederländischen Mathematiker und Physiker Willebrordus Snellius benannten Gesetz enthalten, das er 1621 formuliert hat. Danach ist der Sinus des Ausfallswinkels in Wasser gleich einem Bruchteil des Sinus des Einfallswinkels in Luft. Der Bruchteil ist gerade das Ver-

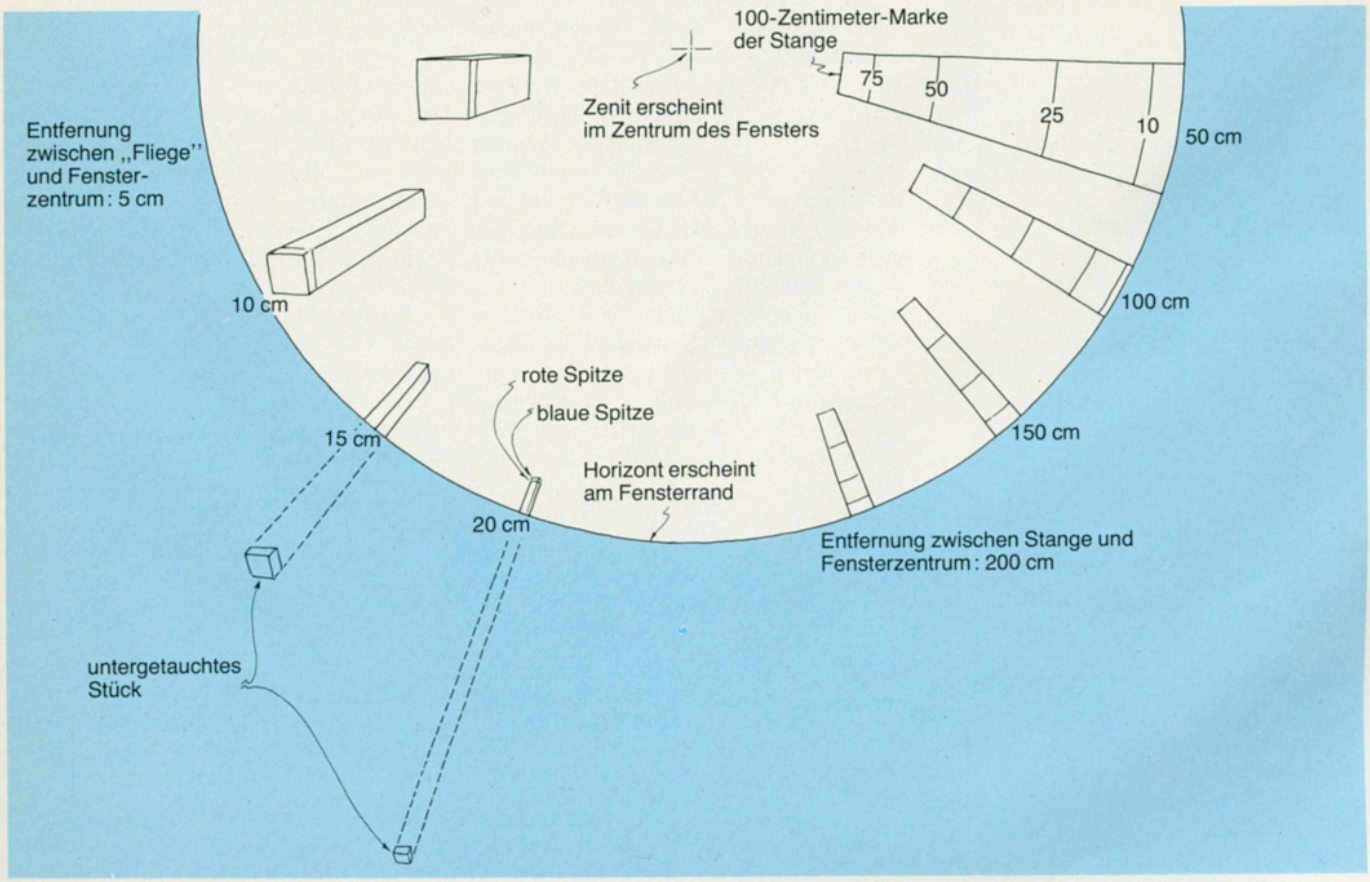


Bild 1: Blick eines Fisches durch sein „Fenster" an der Wasseroberfläche.

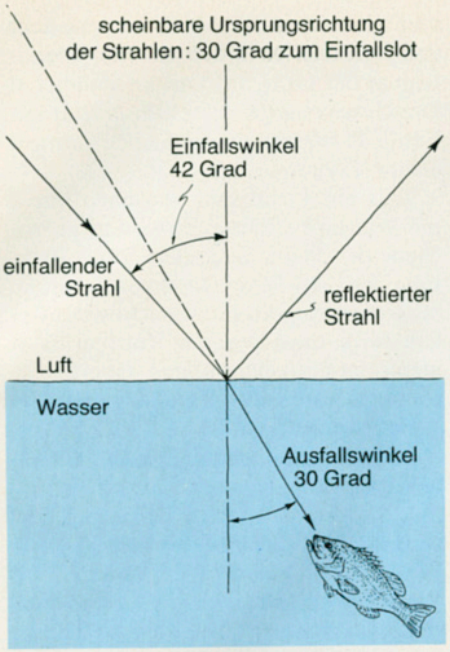
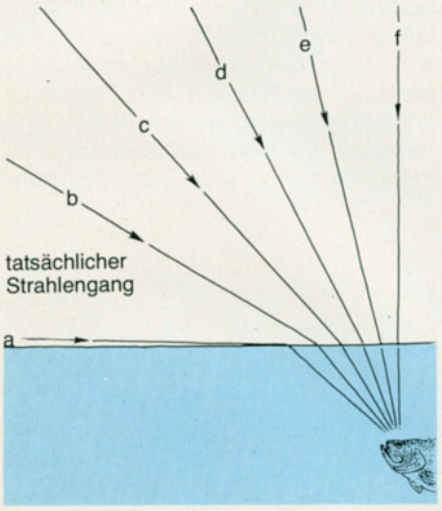


Bild 2: Lichtbrechung an der Oberfläche eines Gewässers.



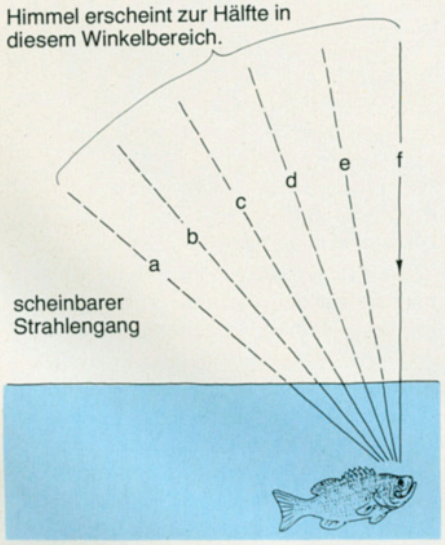


Bild 3: Tatsächliche und scheinbare Richtung der Lichtstrahlen.

hältnis der entsprechenden Brechungsindices (Luft : Wasser). Der Ausfallswinkel hat in diesem Fall immer kleinere Werte als der Einfallswinkel, außer wenn der Strahl senkrecht auf die Wasseroberfläche fällt: Dann tritt er ohne Richtungsänderung durch sie hindurch (Bild 3 oben).

Betrachten wir einmal einen Strahl, der den Fisch von einem Objekt dicht über der Wasseroberfläche erreicht. Falls der Fisch den scheinbaren Ausgangspunkt des Lichtstrahls extrapolieren kann (wie wir es tun), wird er das Objekt irgendwo in rückwärtiger Verlängerung des gebrochenen Strahls zu sehen glauben (Bild 3 unten). Das Objekt scheint also höher als tatsächlich am Himmel zu stehen. Der Fehler ist bei kleinem Einfallswinkel noch klein, wird aber mit wachsendem Einfallswinkel größer.

Ein Fenster zur Überwasserwelt

Ein fast horizontal auftreffender Strahl – mit einem Einfallswinkel von nicht ganz 90 Grad – wird am stärksten gebrochen. Sein Ausfallswinkel beträgt etwa 48,7 Grad (der genaue Wert hängt von der Wellenlänge des Lichts und der Dichte des Wassers beispielsweise ab). Daher liegen alle Strahlen, die aus der Luft kommend den Fisch erreichen, in einem imaginären Kegel – mit der Spitze im Auge des Fisches und einem Öffnungswinkel von $2 \times 48{,}7$ Grad (Bild 4).

Den Schnitt dieses Kegels mit der Wasseroberfläche bezeichnen Harmon und Cline als das „Fenster", durch das der Fisch Objekte oberhalb des Wassers sieht. Ein vom Horizont kommender Strahl fällt am Rand des Fensters ein und dann am Kegelmantel hinunter zum Auge. Der Durchmesser des Fensters wächst mit der Schwimmtiefe des Fisches. So erreicht er in 10 Zentimeter Tiefe 22,6 Zentimeter, in 20 Zentimeter Tiefe genau das Doppelte. Der Öffnungswinkel des Kegels bleibt dabei der gleiche; denn er ist durch den Brechungswinkel der Horizontalstrahlen festgelegt.

Der Fisch sieht nur ein verzerrtes Bild seiner Außenwelt, da die Vergrößerung in zwei zueinander senkrechten Raumrichtungen verschieden ist. Die Brechung entstellt und verschiebt die Objekte. Vielleicht kann der Fisch das verzerrte Bild richtig deuten und erkennen, daß die im Fenster erscheinenden Objekte sich in einiger Entfernung über der Wasseroberfläche befinden. Vielleicht sind sie für ihn aber auch nur flach auf dem Wasserspiegel liegende Objekte. Wie dem auch sei, wie sieht nun ein Angler für den Fisch aus?

Der Angler aus der Fischperspektive

Um die Frage zu klären, habe ich meinen Heimcomputer programmiert, die Brechung für eine aufrecht vor dem Fisch stehende Stange zu berechnen, wenn diese einen Meter hoch über den Wasserspiegel ragt und 20 Zentimeter tief eintaucht. Sie sollte in etwa einen kleinen, in flachem Wasser stehenden Angler simulieren. Den Fisch ließ ich 10 Zentimeter unter der Oberfläche auf Fliegen lauern, eine ganz vertretbare Tiefe für einen hungrigen Fisch.

Als erstes habe ich diese Stange in zwei Meter Entfernung vor dem Fisch aufgestellt. Lichtstrahlen von ihrem untergetauchten Teil werden nicht gebrochen und daher an der richtigen Stelle wahrgenommen (sofern der Fisch so weit sehen kann). Lichtstrahlen von dem Teil, der dicht über der Wasseroberfläche liegt, fallen am Rand des Fensters ein und dann an dem imaginären Kegelmantel entlang, der die Grenze für die aus der Luft beim Fisch eintreffenden Strahlen bildet (Bild 5). Vielleicht deutet der Fisch diese „Mantelstrahlen" so, als kämen sie geradlinig von irgendwo weiter hinten her. Die Wassergrenze an der Stange würde ihm dann unter einem Einfallswinkel von 48,7 Grad erscheinen.

Ein Lichtstrahl von der Spitze der Stange fällt etwas näher zur Mitte des Fensters ein, denn sein Brechungswinkel beträgt etwa 42 Grad. Der Fisch sieht möglicherweise das Licht wieder aus der rückwärtigen Verlängerung des gebrochenen Strahls herkommen. Dann würde für ihn die Spitze der Stange auf einer Geraden liegen, die 42 Grad gegen das Lot geneigt ist. Wenn der Fisch also eine Tiefenwahrnehmung besitzt, würde ihm die Stange irgendwo in der Luft unter einem Einfallswinkel zwischen 42 und 48,7 Grad erscheinen.

Die in Bild 5 dargestellte Situation zeigt, daß das Abbild der Stange zwischen diesen beiden Winkeln gekrümmt ist. Um Platz für die anderen Bildteile zu schaffen, wurde es in etwa dem Abstand zum Fenster gezeichnet, in dem auch die Stange steht.

Nehmen Sie das Bild aber nicht einfach so hin. Ich habe keine Ahnung, ob ein Fisch Lichtstrahlen extrapolieren kann. Ich weiß nicht einmal, ob er eine Stange als solche zu erkennen vermag. Sicherlich kann er nicht von dem augenscheinlich verzerrten Objekt auf eine senkrechte, gerade Stange schließen. Ein Großteil unserer Fähigkeit, Raumtiefe und Gestalt von Objekten zu erkennen, geht auf Erfahrung mit diesen Objekten zurück.

Mit meinem Computer habe ich dann noch die Winkelpositionen der Stange

für Abstände von 150, 100 und 50 Zentimeter berechnet. Wie zuvor sieht der Fisch zwei Bilder: Der herausragende Teil der Stange wird im Fenster wahrgenommen, der untergetauchte Teil in seiner wirklichen Position, also ein gutes Stück vom anderen entfernt. Wenn ich die Latte – sprich den heranpirschenden Angler – näher ans Fenster des Fisches schiebe, nähern sich auch die beiden Teilbilder einander und vereinigen sich schließlich, sobald die Stange den Rand des Fensters erreicht.

Die rechte Hälfte von Bild 1 zeigt eine zweidimensionale Ansicht von vier solcher Stangen, wie sie durch die Brechung im Fenster erscheinen. Ein Fisch ohne Tiefenwahrnehmung oder jegliches Verständnis dessen, was er da sieht, muß wahrscheinlich mit so einem ebenen, zweidimensionalen Bild der Außenwelt auskommen.

Damit sich die Stangen in der Darstellung nicht überschneiden, habe ich sie in einem Kreis um den Fisch angeordnet. Ihre Länge und ihr Abstand zum Fisch sind wie vorher. Die untergetauchten Teile wurden weggelassen, weil sie zu weit entfernt sind, um noch hineinzupassen. Die Marken an den Stangen geben die Höhe über dem Wasserspiegel an.

Der unmittelbar an der Wasseroberfläche liegende Teil der Stangen erscheint am Rand des runden Fensters, die Spitze hingegen radial in Richtung der Fenstermitte. Eine zwei Meter vom Fisch entfernte Stange wird darin auf ein kleines Rechteck gestaucht. Ihr unterer Abschnitt ist davon stärker betroffen als der obere, weil die von der Spitze kommenden Lichtstrahlen weniger gebrochen werden. Das Abbild der Stange ist vom Rand zum Zentrum hin nicht einmal 2,5 Zentimeter „hoch", das Fenster selbst aber 22,6 Zentimeter breit. Da auch viele andere, etwa das Ufer säumende Objekte am Rand des Fensters abgebildet werden, dürfte sich die Stange in dem Durcheinander verlieren.

Die 150, 100 und 50 Zentimeter vom Fisch entfernten Stangen erscheinen im Fenster zwar weniger gestaucht. Da sie aber näher ans Zentrum heranreichen, verjüngen sie sich merklich. Am stärksten ist der Überwasserteil der 50 Zentimeter entfernten Stange verzerrt. Da sein Bild in der Höhe aber 70 Prozent vom Fensterradius überdeckt, muß es für den Fisch recht auffällig sein.

Meine Stange ist das Äquivalent eines – zugegeben recht kleinen – Anglers. Steht er 2 Meter oder weiter vom Fisch entfernt, so wird sein Überwasser-Bild zu einer Miniatur gestaucht, die nur einen Bruchteil des Fensters ausfüllt und leicht im Wirrwarr des Randbereichs untergeht. Nähert sich mein Angler dem Fisch, so erscheint er unter einem größeren Winkel im Sehfeld und beansprucht mehr Fensterfläche. Auch die Unterwasserteile des Anglers, seine Füße also, vergrößern sich im Sehfeld des Fisches.

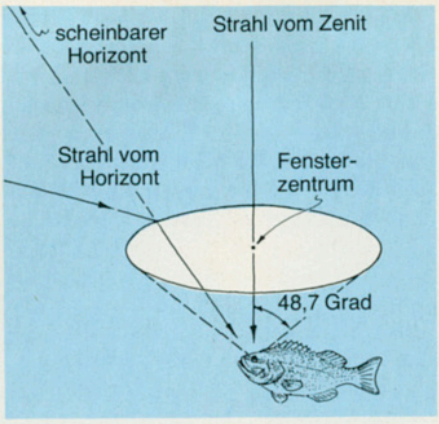


Bild 4: Geometrie des Fensters.

An irgendeinem Punkt wird dann der Fisch durch die Bewegung eines dieser Bilder vor einer drohenden Gefahr gewarnt. Der sich nähernde Überwasserteil des Anglers erzeugt ein Bild, das am Rande des Fensters auftaucht und radial nach innen zum Mittelpunkt wächst. Vielleicht ist der Fisch vor solchen Bewegungen auf der Hut, die das Bild vom Rand zur Mitte hin wachsen lassen.

Die Köderfliege in Fischperspektive

Die Strahlenoptik läßt sich nun in gleicher Weise auch auf das Erscheinungsbild einer Fliege anwenden, die vom Angler zum Standort des Fisches geworfen wird. Wie sie in Abhängigkeit von der Treffgenauigkeit aussieht, ist in der linken Hälfte von Bild 1 dargestellt.

Der Einfachheit halber habe ich die Fliege zu einem aufrechten Bauklötzchen verunstaltet, das 2,5 Zentimeter aus dem Wasser ragt und 0,2 Zentimeter tief eintaucht. (Für Nicht-Angler sei angemerkt, daß die Köderfliege mit der Spitze nach oben senkrecht am Haken hängt.) Die von mir gewählte Höhe entspricht ungefähr der einer Trockenfliege der amerikanischen Größe 4; die horizontalen Ausmaße sind hier unwichtig. Zwar dürfte eine solch rechteckige Fliege schwerlich dem Fisch Appetit machen, doch läßt sich an ihr die Verzerrung durch die Lichtbrechung anschaulich demonstrieren.

Ich ließ meinen Computer nun die „Fensterbilder" der Fliege berechnen, wenn der Fisch 10 Zentimeter tief im Wasser steht. Landet der Köder 5 Zentimeter von der Fenstermitte entfernt, so erscheint sein Überwasser-Bildteil in radialer Richtung nur 1,3 Zentimeter lang; sein Unterwasser-Bildteil ist gestaucht und geht nahtlos in den anderen über.

Ziehe ich die Fliege näher zum Rand der Fensterfläche, so streckt sich der Überwasser-Bildteil. Hat sie sich 10 Zentimeter vom Zentrum entfernt, dann ist dieser Bildteil – in radialer Richtung gemessen – 3 Zentimeter lang. Das ist mehr als die tatsächliche Höhe der Fliege. Da sich auch der noch daranhängende Unterwasser-Bildteil leicht gestreckt hat, sollte die Fliege nun für den Fisch insgesamt auffälliger sein.

Sobald die Fliege über den Fensterrand (Abstand zum Zentrum 11,3 Zentimeter) hinausgezogen wird, beginnt das obere der beiden Teilbilder stark zu schrumpfen, während sich das untere davon trennt und aus dem Fenster bewegt. Wenn die Fliege 15 Zentimeter von der Fenstermitte entfernt ist, bekommt der Fisch die Obergrenze ihres Unterwasserteils im richtigen Abstand zum Mittelpunkt zu sehen. Die Untergrenze des Überwasserteils hingegen erscheint davon getrennt am Rand des Fensters. Die „Nasenspitze" der Fliege, die in Wirklichkeit 2,5 Zentimeter über das Wasser hinausragt, ist nur 1,9 Zentimeter hoch über dem Fensterrand zu sehen. Die Fliege ist also für den Fisch nicht mehr so leicht zu erkennen.

In 20 Zentimeter Entfernung von der Fenstermitte erscheint dann das Überwasserteil der Fliege noch stärker gestaucht. Seine Untergrenze liegt am Fensterrand, seine Obergrenze etwa 0,8 Zentimeter darüber. Diese Stauchung gibt dem Fisch ein äußerst entstelltes Abbild der Fliege, das zudem leicht in dem Durcheinander am Fensterrand untergeht. Dem Fisch fällt es also noch schwerer, die Fliege zu erkennen. Hinzu kommt, daß der Unterwasser-Bildteil ein ganzes Stück vom Fenster entfernt ist. Selbst wenn beide Bilder noch auszumachen sind, sieht der Fisch sie wahrscheinlich als zwei getrennte kleine Objekte an.

Die Lehren für die Praxis

Harmon und Cline empfehlen daher, die Fliege so nah wie irgend möglich an den Fisch zu werfen (falls man mit Fliegen angelt und den Fisch sieht, natürlich). Landet die Fliege im Fenster, so mag sie für den Fisch als solche erkennbar sein. Zumindest gehen dann die beiden Bildteile nahtlos ineinander über. Landet die Fliege gerade am inneren Rand des Fensters, so wird das Bild ihres Überwasserteils in radialer Richtung auf eine Länge vergrößert, die dessen wirkliche Höhe übertrifft.

Verfehlt der Wurf sein Ziel um einige Zentimeter, so hängt die Fliege vielleicht schon außerhalb des Fensters. Da dann

beide Bildteile getrennt sind, sieht die Fliege viel weniger nach Fliege aus. Obendrein kann der obere Bildteil durch die Stauchung so klein werden, daß er sich im Wirrwarr des Fensterrandes ganz verliert.

Besonders verzwickt wird die Sache, wenn die Fliege in der Fluchtlinie zwischen Fisch und Angler landet, denn dann trägt dessen Bild zum Durcheinander am Fensterrand bei. Die einzige Chance für den Angler ist, mit dem untergetauchten Teil der Fliege die Aufmerksamkeit des Fisches zu erregen, denn nur dieses kann der Fisch ohne Verzerrung durch die Lichtbrechung erkennen. Harmon und Cline schlagen daher vor, das Fliegenende doch grell einzufärben.

Farbränder und Spiegelungen

Bis jetzt habe ich so getan, als ob der Brechungsindex von Wasser nur einen Wert habe. Tatsächlich ändert er sich aber mit der Wellenlänge des Lichtes. Für rotes Licht, am langwelligen Ende des sichtbaren Spektrums, beträgt er ungefähr 1,331, für blaues Licht, am kurzwelligen Ende, etwa 1,343.

Angenommen, ein Strahl weißen Lichts, das alle Farben enthält, trifft auf die Wasseroberfläche. Durch die Lichtbrechung werden die verschiedenen Farben – ganz ähnlich wie bei einem Prisma – über einen kleinen Winkelbereich aufgefächert. Der blaue Strahl hat den kleinsten Brechungswinkel, der rote den größten. Die übrigen sichtbaren Spektralfarben liegen entsprechend ihrer Wellenlänge dazwischen. Diese Zerlegung in die Spektralfarben bezeichnet man als Dispersion.

Harmon und Cline betonen, daß die Dispersion nur eine untergeordnete Rolle für das Bild spielt, das der Fisch in seinem Fenster sieht. Ich habe dazu einmal die Strahlen weißen Lichts betrachtet, die von der Nasenspitze meiner rechtekkigen Fliege ausgehen (Bild 6). Einer dieser Strahlen wird so an der Wasseroberfläche gebrochen, daß ein roter Teilstrahl in Richtung Fisch weiterläuft; ein anderer dieser Strahlen trifft etwas näher zur Fenstermitte auf und produziert einen blauen Teilstrahl in Richtung Fisch. Der sieht ein farbiges Bild, wo die Lichtstrahlen in das Fenster eintreten. Zwar liegt das blaue Bild der Fliegenspitze etwas weiter zur Fenstermitte hin verschoben als das rote, doch ist die Dispersion des farbigen Bildes insgesamt gering, solange sich die Fliege nicht ein gutes Stück außerhalb des Fensters befindet. Aber selbst dann sind beide Farben im Fenster nicht mehr als etwa einen Millimeter voneinander getrennt.

Was der Fisch an der Wasseroberfläche außerhalb seines Fensterbereiches sieht, sind hauptsächlich Lichtstrahlen, die vom Boden des Gewässers rückgestreut und an der Luft-Wasser-Grenze reflektiert werden. Die Lichtbrechung vom Wasser in die Luft muß ebenfalls dem Snelliusschen Gesetz gehorchen. Für gewisse Lichtstrahlen ist eine Brechung nicht möglich, weil ihr Einfallswinkel zu groß ist. Liegt er unter 48,7 Grad, so wird ein Teil des Lichts durch die Oberfläche gebrochen, der Rest nach unten reflektiert. Nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz muß der Ausfallswinkel (jetzt in Luft) größer sein als

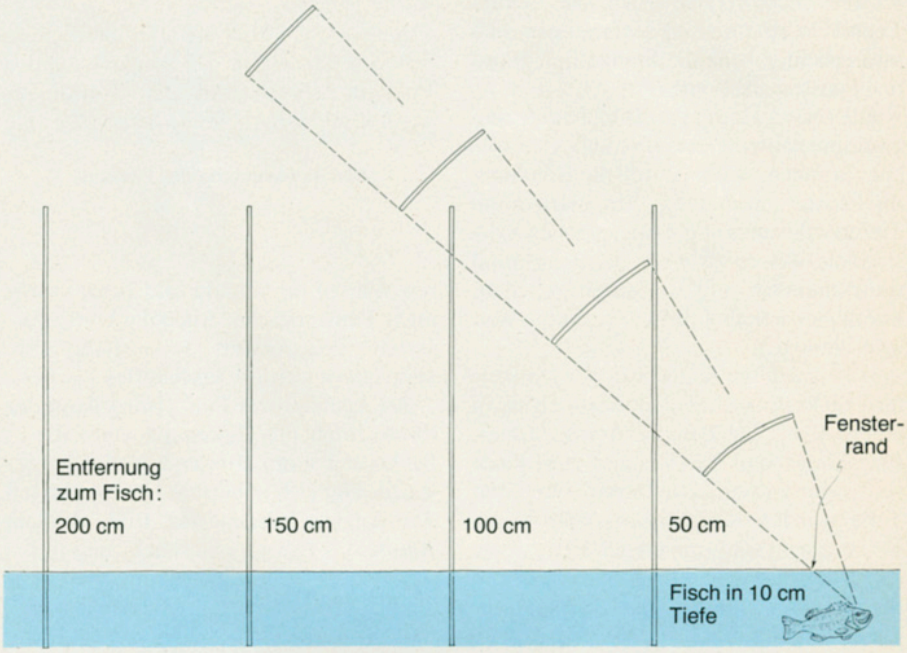


Bild 5: Wie der Fisch vielleicht aus dem Wasser herausragende Stangen sieht.

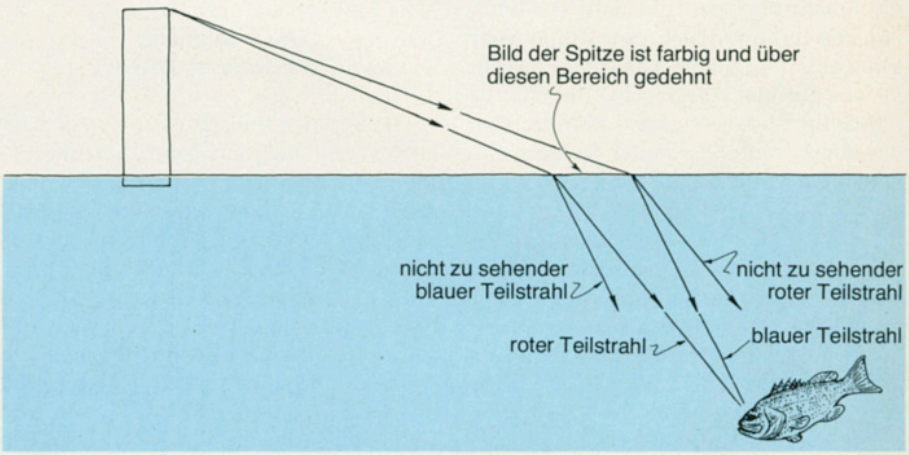


Bild 6: Dispersion des Lichtes.

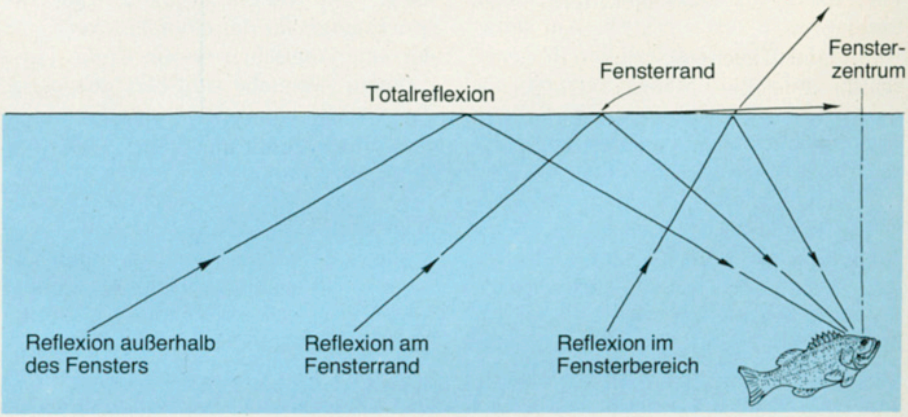


Bild 7: Reflexion an der Unterseite der Wasseroberfläche.

der Einfallswinkel. Er kann aber höchstens 90 Grad betragen: Dann streift der gebrochene Strahl gerade die Wasseroberfläche. Dies ist bei einem Einfallswinkel von genau 48,7 Grad der Fall. Darüber wird eine Brechung unmöglich. Das Licht kann nur noch reflektiert werden, was man in der Physik als Totalreflexion bezeichnet.

Alles Licht, das von der Unterseite des Fensters zum Fisch reflektiert wird, muß zwangsläufig einen Einfallswinkel von weniger als 48,7 Grad haben (Bild 7). Ein Teil dieses Lichts wird dort in die Luft gebrochen. Ein Strahl, der genau vom Fensterrand reflektiert wird, fällt unter einem Winkel von 48,7 Grad ein, sein gebrochener Anteil streift über die Wasseroberfläche. Alles Licht, das von der übrigen Wasseroberfläche zum Fisch reflektiert wird, muß Einfallswinkel über 48,7 Grad haben und unterliegt daher der Totalreflexion. Die Reflexionen aus dem Fensterbereich gehen wahrscheinlich in der Helligkeit des Himmels unter, die anderen aber könnten hell genug sein und dem Fisch ein Spiegelbild des Grundes liefern.

Die hier beschriebene Strahlenoptik läßt sich auch anwenden, wenn der Fisch durch die Seitenscheibe eines Aquariums blickt. Hier sitzt sein Fenster natürlich senkrecht. Die durch die Brechung entstehende Verzerrung würde die Geometrie der Gegenstände außerhalb des Aquariums verändern. So würde beispielsweise ein quadratisches Objekt die Form eines Nadelkissens bekommen.

Der Mensch als Fisch . . .

Das menschliche Auge sieht unter Wasser keine dieser optischen Verzerrungen, weil es an das Sehen in Luft angepaßt ist. Die zum Fokussieren nötige Brechung findet normalerweise zu ungefähr zwei Dritteln an der Augenoberfläche statt. Da das Auge aber etwa den gleichen Brechungsindex wie Wasser hat, verliert es diesen Anteil beim ungeschützten Tauchen: Es kann dann ein im Fenster abgebildetes Objekt nicht mehr fokussieren.

Mit einer Taucherbrille, die eine Luftschicht über den Augen festhält, gelingt das jedoch wieder. Gibt es dann einen Fenstereffekt? Nicht, solange die Scheibe der Tauchmaske parallel zur Wasseroberfläche steht. Dann werden nämlich an der zweiten Grenzschicht – vom Wasser zur Luft der Taucherbrille – die Lichtstrahlen in genau umgekehrter Weise gebrochen wie beim Eindringen an der Wasseroberfläche, so daß sie wieder ihre ursprüngliche Richtung bekommen. Dadurch verschwindet der strahlbegrenzte Kegel und mit ihm das Fenster. Vielleicht haben Sie Lust bekommen, einmal den Strahlengang bei anderen Orientierungen der Taucherbrille zu untersuchen.

. . . und Angler

Ich habe mich auch kurz mit einem anderen Problem der Lichtbrechung beim Angeln beschäftigt. Können Sie eigentlich von der Warte des Anglers aus den Fisch in seiner wirklichen Position sehen? Eine entscheidende Frage, wenn Sie – wie einige wenige Leute – mit Pfeil und Bogen zu fischen versuchen.

Sollten Sie dorthin zielen, wo der Fisch zu sehen ist? Auf keinen Fall, es sei denn, Ihre Beute schwimmt unmittelbar unter der Oberfläche. Sonst müssen Sie etwas tiefer zielen. Denn die vom Fisch kommenden Lichtstrahlen werden nach dem Snelliusschen Gesetz gebrochen, haben also, wenn sie das Auge erreichen, einen größeren Ausfalls- als Einfallswinkel. Die wahrgenommenen Lichtstrahlen extrapolieren Sie unbewußt geradlinig zurück und glauben deshalb fälschlich, der Fisch stehe in eben dieser Richtung.

Mit ähnlichen Problemen der Lichtbrechung bei untergetauchten Objekten hat sich Lawrence E. Kinsler befaßt. Die Tiefe wird, wie er betont, auch dann falsch eingeschätzt, wenn Sie einen solchen Gegenstand direkt von oben betrachten. Denn unsere Entfernungswahrnehmung basiert zu einem guten Teil auf der Konvergenz, also darauf, wie weit sich die Sehachsen beider Augen aufeinander zubewegen müssen, um das Objekt zu fixieren. (Je näher das Objekt, desto größer die Konvergenz.) Da die Lichtstrahlen an der Wasseroberfläche gebrochen werden, bevor sie die Augen erreichen, liegt der Konvergenzpunkt über dem Objekt (Bild 8), das uns damit als näher, also weniger tief im Wasser erscheint.

Schräge Blickwinkel bringen ebenfalls eine falsche Entfernungseinschätzung mit sich. Kinslers Ergebnisse darüber sind – mit einem Fisch als Objekt – in Bild 9 zusammengefaßt. Ein Lichtstrahl ist stellvertretend für alle übrigen eingezeichnet, die vom Fisch kommend den Beobachter erreichen. Tatsächlich empfangen aber beide Augen Lichtstrahlen vom selben Punkt unter etwas verschiedenen Winkeln.

Der Beobachter glaubt, der Fisch schwimme in der rückwärtigen Verlängerung der wahrgenommenen Strahlen. In Bild 9 ist das nur für den einen Lichtstrahl eingezeichnet. Die Konvergenz – der Schnittpunkt der Sehachse beider Augen – bestimmt, wo der Fisch auf den extrapolierten Sehstrahlen zu liegen scheint. Insgesamt erscheint der Fisch

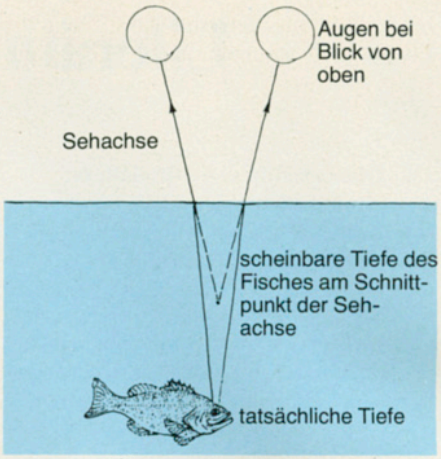


Bild 8: Täuschung bei der Tiefe.

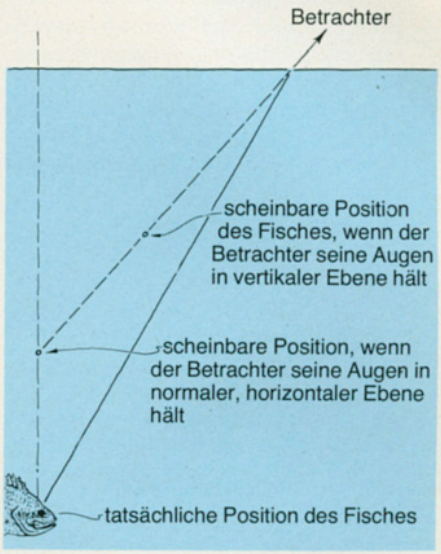


Bild 9: Scheinbarer Standort des Fisches.

damit ein Stück höher auf einer senkrechten Linie über seinem wirklichen Aufenthaltsort. So sieht es jedenfalls ein Beobachter bei normaler Kopfhaltung.

Angenommen aber, er legt sich seitlich auf einen Bootssteg und blickt mit den Augen in vertikaler Ebene schräg nach unten. Wie zuvor scheint der Fisch am Schnittpunkt der rückwärtigen Verlängerung der beiden Sehachsen zu schwimmen, nur ist er jetzt höher und näher am Beobachter (Bild 9).

Sie können diese optischen Täuschungen leicht in der gefüllten Badewanne nachprüfen. Werfen Sie einen Pfennig oder eine andere Münze hinein. Wenn Sie ihn schräg von oben betrachten, stimmt die wahrgenommene Tiefe offensichtlich nicht mit der tatsächlich meßbaren Tiefe des Wannenwassers überein. Wenn Sie nun Ihren Kopf so weit zur Seite kippen, daß Ihre Augen in einer vertikalen Ebene stehen, dann verlagert sich die Münze scheinbar sofort weiter nach oben in Ihre Nähe. Probieren Sie es beim nächsten Badetag doch einmal aus.