

Simulationen zu Anwendungen der Totalreflexion

M. Wenzel u. T. Wilhelm

1. Simulationen

Simulationen werden gerne im Physikunterricht eingesetzt – vor allem, wenn die Rechenergebnisse als Animation dargestellt werden. Klassische Simulationen werden von einem Experten erstellt und können von der Lehrkraft bzw. den Schülern nicht verändert werden. Neben der Ablaufsteuerung (Start/Stop/Pause) können höchstens Parameter variiert werden. Anders ist das bei einem Simulationsbaukasten wie Interactive Physics [1], Yenka [2] oder Algodoo [3], das hier verwendet wird. Im kostenfreien Algodoo zeichnet man Objekte auf die Arbeitsfläche, von denen man die physikalischen Eigenschaften, wie zum Beispiel Dichte, Masse, Reibung, Stoßelastizität und Anziehungskraft, verändert oder für die man ein vorgefertigtes Material auswählt [4]. Beim Start der Simulation verhalten sich diese Objekte wie in Wirklichkeit, ohne dass man zuvor das Verhalten durch physikalische Gleichungen beschreiben musste. So können Simulationen leicht erstellt oder vorhandene leicht verändert werden. Schüler können vorgegebene Objekte neu anordnen, deren Eigenschaften ändern oder weitere Objekte erzeugen. Seit dem Update auf Version 2 gibt es auch optische Einsatzmöglichkeiten. Man kann die Lichtdurchlässigkeit von Körpern einstellen und einzelne Laser platzieren, die einen idealen Lichtstrahl aussenden. Interessante Anwendungen bieten sich außerdem durch die Möglichkeit, transparente Körper mit unterschiedlichem Brechungsindex unterschiedlich anzuordnen.

2. Totalreflexion

Zwei wesentliche Eigenschaften des Lichts in der geometrischen Optik sind die Reflexion und die Brechung. Diese beiden Eigenschaften hängen zusammen, denn wenn ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche zwischen zwei verschiedenen Medien fällt, wird ein Teil davon reflektiert und ein Teil tritt unter Richtungsänderung in das Medium ein. Die Totalreflexion ist ein Spezialfall davon: Beim Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium wird bei einem bestimmten Grenzwinkel für den einfallenden Strahl der Brechungswinkel 90° erreicht, so dass für größere Einfallswinkel keine Brechung mehr auftritt und der einfallende Strahl vollständig reflektiert wird.

Die Totalreflexion nimmt in den meisten Schulbüchern und Lehrplänen nur eine Randstellung ein. Dies liegt wohl daran, dass es sich nur um einen Spezialfall des wichtigen Brechungsge-

setzes handelt und die Totalreflexion im Gegensatz zur Brechung im weiteren Physikunterricht nicht mehr gebraucht wird. Neben etlichen „Zauberkunststücken“ bzw. Freihandexperimenten gibt es aber sehr viele Anwendungen der Totalreflexion in der Natur und vor allem in der Technik.

3. Regensensor

Ein bekanntes Beispiel für eine technische Anwendung der Totalreflexion ist der Regensensor [5]. In vielen modernen Autos gehört er zur Standardausstattung. Sein Funktionsprinzip ist recht einfach: Das Gehäuse des Regensensors, das Laserdioden und Detektor enthält, hat abgesehen von zwei Silikonkissen keinen Kontakt mit der Frontscheibe, so dass eine Luftschicht zwischen Frontscheibe und Regensensor ist. Ein Laserstrahl, der im transparenten Plastik des Regensensors läuft, wird über ein Silikonkissen in die Frontscheibe des Autos so eingekoppelt, dass der Laser innerhalb der Scheibe mehrfach totalreflektiert wird. Anschließend tritt das Licht durch das zweite Silikonkissen wieder aus und wird von dem Detektor aufgefangen. Fällt nun Regen auf die Scheibe, trifft der Laserstrahl an manchen Stellen nicht mehr auf die Grenzfläche von Glas zu Luft, sondern von Glas zu Wasser. Da Wasser einen höheren Brechungsindex als Luft hat, liegt ein anderer Grenzwinkel für die Totalreflexion des Laserlichts vor. Auf diese Art und Weise tritt nun an manchen Stellen Licht aus der Glasscheibe aus, geht in den Wassertropfen und von dort in die Luft. So gelangt es nicht mehr zum Detektor. Die empfangene Intensität nimmt ab und der Scheibenwischer wird aktiviert, um das Wasser von der Frontscheibe zu entfernen.

Dies lässt sich durch verschiedene Experimente im Unterricht veranschaulichen [5]. Nimmt man als Modell der Glasscheibe einen selbst hergestellten länglichen Gelatineblock und strahlt von der Seite schräg mit einem Laser hinein, kann man erkennen, welchen Weg der Lichtstrahl nimmt. Auch hier ist es möglich, an der Ober- und Unterkante des Blocks jeweils Totalreflexion hervorzurufen. Gibt man mit einer Sprühflasche nun Wasser auf die Oberfläche des Blocks oder berührt ihn mit dem Finger, lässt sich das gleiche Phänomen wie in der Realität erkennen: Der Lichtstrahl wird nicht mehr totalreflektiert. Ein Gelatineblock bietet sich an, weil das Licht in ihm etwas zur Seite gestreut wird, und man im Gegensatz zu Glas den gesamten Strahlengang sichtbar machen kann.

In Algodoo lässt sich eine Simulationen analog dazu entwi-

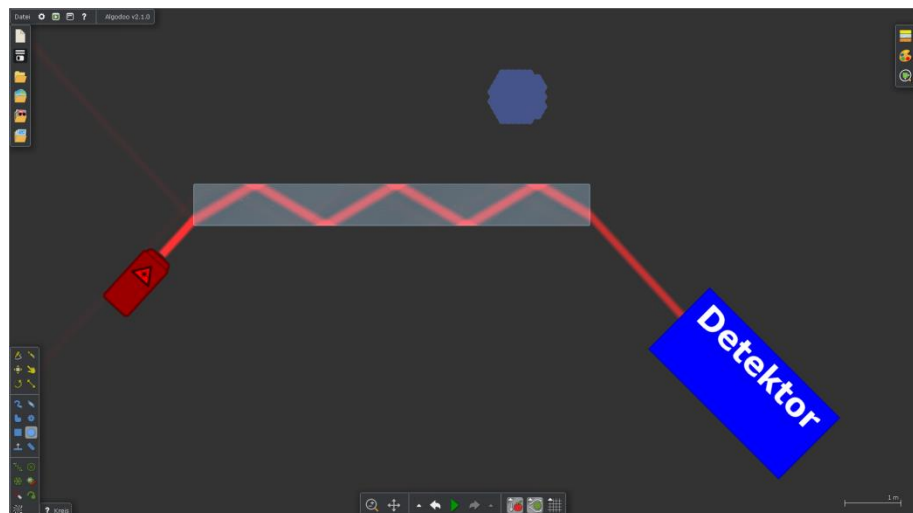


Abb. 1: Einfache Simulation zum Regensensor in Algodoo

ckeln. Da man im Zweidimensionalen arbeitet, verwendet man als Querschnitt der Frontscheibe ein Rechteck, dem man die physikalischen Eigenschaften von Glas zuweist. Damit sind Brechungsindex, Transparenz und Dichte automatisch angepasst. Man kann nun mit einem didaktisch reduzierten Modell, der reinen Glasscheibe (siehe Abb. 1), weiterarbeiten oder ein Regensensorgehäuse mit den Silikonkissen (siehe Abb. 2) hinzufügen. Mit einem Klick lässt sich ein „Laserstift“ anbringen und so ausrichten, dass innerhalb der Glasscheibe mehrfach Totalreflexion auftritt. Um zu verdeutlichen, dass das Licht in einem bestimmten Bereich wieder aufgefangen wird, kann man noch ein nichttransparentes Rechteck als Detektor anbringen (siehe Abb. 1+2). Damit steht der grundsätzliche Aufbau.

Die eigentliche Funktionsweise wird erkennbar, wenn man nach und nach einige Wassertropfen auf die Scheibe fallen lässt. Dazu muss man lediglich einige beliebige Körper oberhalb der Scheibe erzeugen, die man mit Rechtsklick unter „Auswahl verflüssigen“ zu Wasser machen kann. Zur besseren Sichtbarkeit des eigentlichen Phänomens kann man das Fallen der so erzeugten Regentropfen verlangsamen, indem die Simulationsgeschwindigkeit herabgesetzt oder die Erdbeschleunigung verringert wird.

In Abbildung 2 kann man sehen, was passiert, wenn ein Regentropfen auf die Glasscheibe fällt und sich somit die Brechungsindizes von Glas ($n_{\text{Glas}} = 1,5$) zum angrenzenden Medium ($n_{\text{Wasser}} = 1,33$) weniger stark unterscheidet als von Luft ($n_{\text{Luft}} = 1,0$). Mit einem weiteren Objekt können die Schüler das Wasser auch wieder wegwischen.

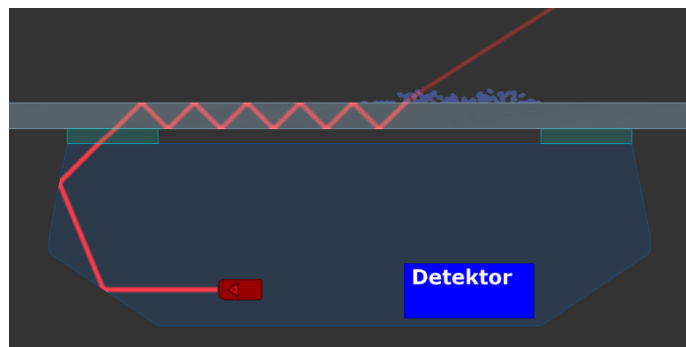


Abb. 2: Regentropfen trifft auf Scheibe, unter der der Regensensor mit Silikonkissen ist

4. Prismen und Brillanten

Eine technisch wichtige Anwendung der Totalreflexion ist die Verwendung von Glas- und Kunststoffprismen als Spiegel, wobei die Totalreflexion an einer oder mehreren Prismenflächen ausgenutzt wird. Die Reflexion ist dabei entscheidend besser als bei Glasspiegeln. In Algodoo kann man ein gleichschenkelig-rechtwinkliges Glasprisma erzeugen und Licht unterschiedlich darauf fallen lassen. Fällt das Licht senkrecht durch eine Kathetenfläche, wird es an der Hypotenusenfläche total reflektiert (90°-Umlenkprisma). Fällt es senkrecht auf die Hypotenusenfläche, wird es an den Kathetenflächen zweimal total reflektiert (180°-Umlenkprisma), wobei Bilder auf den Kopf gestellt werden (Umkehrprisma), was im Prismenfernglas verwendet wird. Fällt das Licht unter 45° auf eine Kathetenfläche, erhält man durch Brechung und Totalreflexion ein geradsichtiges Wendepisma.

Technisch häufig verwendet werden Prismen als Tripelspiegel (drei zueinander senkrecht stehende Spiegelflächen) zur Umkehrung von Lichtstrahlen. Die Rückstrahler von Fahrzeugen bestehen aus vielen kleinen Tripelspiegeln, die aus Kunststoff gepresst werden. Die Prismen kann man sich als abgeschnittene Ecken von Quadern mit drei senkrecht aufeinander

stehenden Flächen vorstellen, deren Spitze von der Lichtquelle wegzeigen. Auch dies lässt sich leicht in Algodoo simulieren. Dazu stellt man lauter gleichschenkelig-rechtwinklige Dreiecke nebeneinander, so dass die Hypotenusen eine ebene Fläche in Richtung Lichtquelle bilden. Eine solche Simulation wurde wie die anderen hier vorgestellten Simulationen von den Autoren in die Algobox (www.algodoo.com/algobox/) gestellt und ist dort unter dem Stichwort „Totalreflexion“ zu finden. Die Algobox ist ein Up- und Downloadportal für Algodoo-Simulationen, auf das man aus Algodoo heraus direkt zugreifen kann.

Eine andere, weniger technische Anwendung der Totalreflexion findet sich in Schmuckstücken wieder. Der Wert eines Diamanten wird durch die sogenannte 4C-Regel bestimmt. Die vier Cs stehen für Colour (Farbe), Cut (Schliff), Clarity (Reinheit) und Carat (Gewicht).

In einer Simulation können wir diese Aspekte beliebig ändern [6]. Auf die optischen Eigenschaften haben aber nur die ersten drei Kriterien einen Einfluss, wobei die Farbe hier eine untergeordnete Rolle spielen soll. Dafür lässt sich in einer Simulation noch zusätzlich der Brechungsindex als Materialkonstante ändern. In der Simulation in Abbildung 3 findet man den zweidimensionalen Querschnitt eines Diamanten, der in Brillantform geschliffen ist. Diese Form ist deshalb besonders interessant, weil sie bei Einstrahlung in die obere Seite und in die schrägen oberen Seiten das Licht durch mehrfache

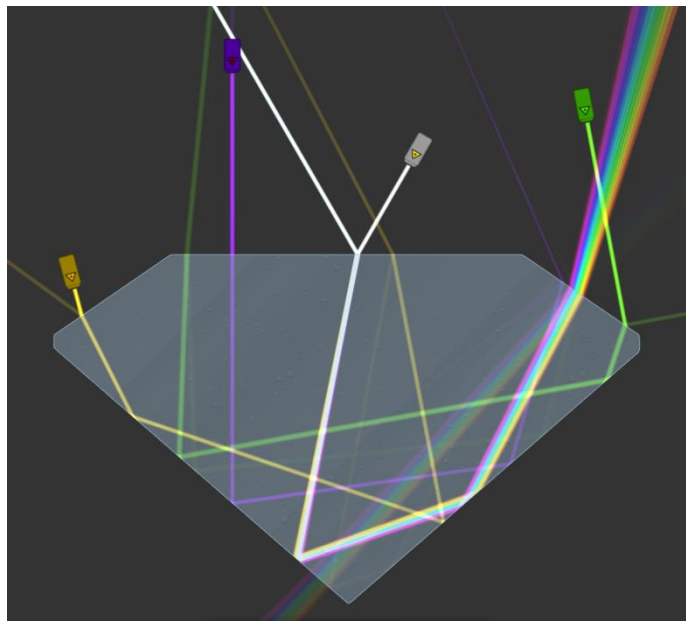


Abb. 3: Querschnitt durch einen Brillanten mit verschiedenen Lichtstrahlen

fache Totalreflexion in seinem Inneren auch wieder nach oben zurückwirft. Eine hohe Dispersion wird angestrebt, um ein reiches Farbenspiel (sogenanntes Feuer) sichtbar zu machen.

Mittels verschiedener Laserstifte kann man den Strahlengang innerhalb des Brillanten bei unterschiedlichen Einfallswinkeln sichtbar machen und Brechung und Totalreflexion beobachten. Sichtbar wird auch, dass bei der Brechung jeweils ein Teil des Lichts reflektiert wird. Nutzt man weißes Licht, so lässt sich auch die Dispersion innerhalb des Brillanten erkennen.

Eine Stärke des Simulationsbaukastens liegt nun darin, dass man auf einfachem Wege verschiedene Modifikationen vornehmen kann. Beispielsweise kann man den Einfluss des Schliffes, also der Form des Brillanten, auf dessen angestrebte Eigenschaften untersuchen, indem man das Skalierungswerkzeug nutzt.

In Abbildung 4 sieht man, dass die Lichtstrahlen im verzerrten Brillanten in steileren Winkeln auf die Grenzflächen zwischen Brillant und Luft auf treffen und ihn daher auch manchmal nach unten hin in die Fassung eines möglichen Schmuckstücks verlassen. Der Brillant hat damit eine geringere Lichtausbeute und wäre aufgrund des minderwertigen Schliffs auch weniger wert.

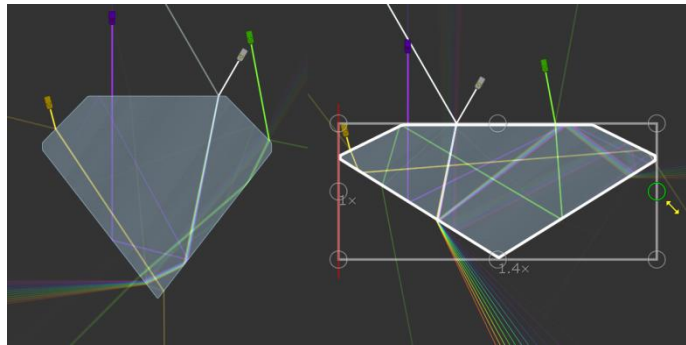


Abb. 4: ein verzerrter Brillant ergibt weniger totalreflektierte Strahlen

Wie bereits angedeutet kann man neben den geometrischen Eigenschaften des Brillanten auch dessen Brechungsindex verändern. Für gewöhnlich liegt der Brechungsindex bei $n_{\text{Diamant}} = 2,42$. In Algodoo kann der Brechungsindex des Materials beispielsweise auf den Brechungsindex von Plexiglas verändert werden oder auch ein doppelt so großer Brechungsindex wie bei Diamant eingestellt werden. Bei Plexiglas verlassen die Lichtstrahlen auch beim richtigen Brillantschliff den Körper leider auf der Unterseite in die Fassung des Schmuckstücks (siehe Abb. 5). Bei dem wesentlich größeren Brechungsindex würde das Licht z.T. auch oben nicht mehr den Brillanten verlassen und vor allem im Inneren hin- und her reflektiert (siehe Abb. 6).

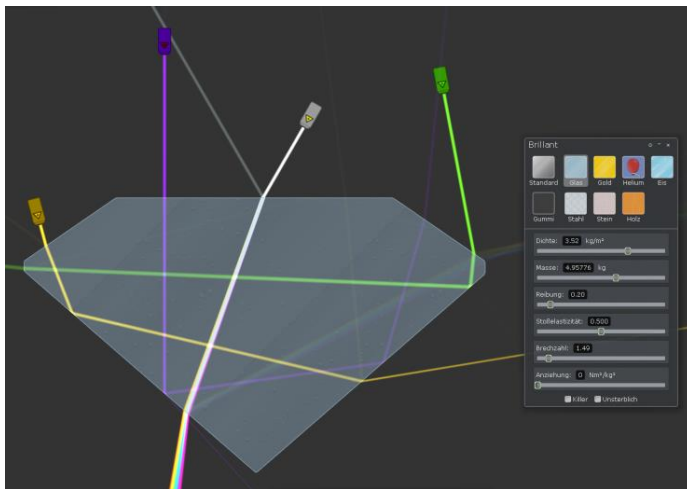


Abb. 5: Brillant mit Brechungsindex von Plexiglas ($n = 1,4$)

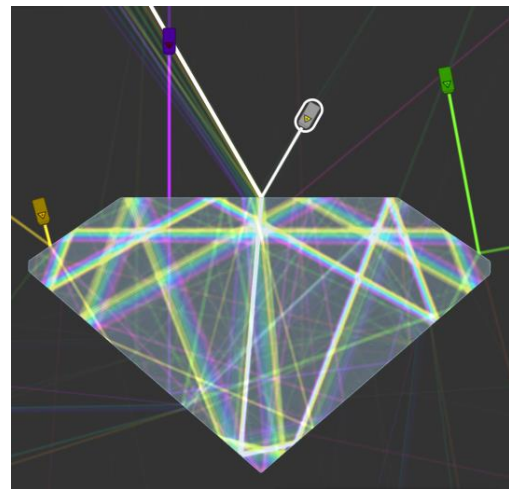


Abb. 6: Brillant mit erhöhtem Brechungsindex ($n = 6,2$)

5. Glasfaser-Endoskop

Die wohl wichtigste technische Anwendung der Totalreflexion ist die Lichtübertragung durch Faseroptik, also Lichtleitfaser aus Glas oder durchsichtigem Kunststoff. Generell kann man hier unterscheiden zwischen Einzelfasern zur Signal-Übertragung, ungeordneten Faserbündeln zur Beleuchtung und geordneten Faserbündeln zur Bildübertragung. Einzelfasern haben eine große Bedeutung zur optischen Nachrichten- und Datenübertragung (Telefon, Kabelfernsehen, Rechnernetz etc.). Fasst man einige tausend solcher dünner Einzelfasern unge-

ordnet zu einem flexiblen Bündel zusammen, erhält man ein Lichtleiterkabel, mit dem man z.B. kleinste Hohlräume ausleuchten und Lichtschranken bauen kann. Mit geordneten Faserbündeln können auch Bilder übertragen werden, was früher im Glasfaser-Endoskop angewandt wurde. Faszinierend sind Bildleitstäbe, die man direkt auf einen gedruckten Text oder ein Bild stellt und den Text am anderen Stabende lesen kann [7]. Zu diesen Themen sind auch im Unterricht verschiedenste Experimente möglich [8+9].

Bei dem üblichen Plexiglasstab, der als Modell einer einzigen Glasfaser dient, können leider der Laserstrahl im Stab und die Reflexionspunkte an der Oberfläche nur schwierig gezeigt werden. In Algodoo kann eine solche Glasfaser erzeugt werden. Noch interessanter ist ein Modell eines Bildleitstabs oder eines Glasfaser-Endoskops (siehe Abb. 7). Während der Bildleitstab direkt auf ein Papier gedrückt wird, sodass das Licht durch den Stab auf das Papier fällt und von dort wieder zurückgesendet wird, hat man beim Glasfaser-Endoskop eine abbildende Linse, die z.B. die Magenwand auf die Glasfaserenden abbildet. In dem Modell befinden sich auf der linken Seite des Bildes vier Lichtpunkte, die unterschiedlich farbiges Licht aussenden. Dieses fällt auf die vier einzelnen Lichtleitfasern des Modell-Endoskops, nachdem es von einer Linse gebündelt wurde. Die Ummantelung wird durch die beiden hellblauen Bahnen oben und unten dargestellt. Da das Erstellen dieser Simulation schwieriger ist, muss man diese vorgeben und kann dann die Schüler anderweitig aktivieren. In vier verschiedenen Szenarien gilt es immer mindestens einen Fehler in der Konstruktion zu finden und zu berichtigen. Dabei gibt es aber auch die Möglichkeit, dass Schüler eigene neue Fehler einbauen.

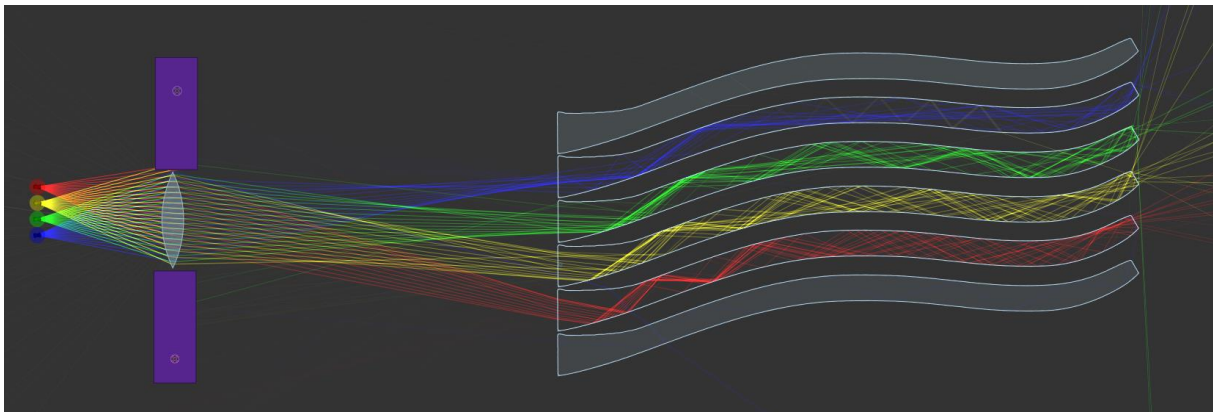


Abb. 7: Modell eines Glasfaser-Endoskops

In Abbildung 8 ist jeweils nur der Bildausschnitt der Simulation dargestellt, in dem sich das Endoskopmodell befindet. In Abbildung 8a sind zwei der Lichtleiter nicht richtig geordnet. Um nicht nur Information in Form von Licht zu senden, sondern auch die Reihenfolge der Bildpunkte gleich zu halten, ist es notwendig, dass die Einzelfasern des Faserbündels, das hier nur aus vier Fasern besteht, am Ausgang genauso angeordnet sind wie am Eingang. Das gilt es an dieser Stelle zu erkennen und mittels des Drehwerkzeuges zu beheben. Man kann erkennen, dass sich die Faser, die das grüne Licht weiterleitet, und die, die das gelbe Licht leitet; überkreuzen und somit eine falsche Farbreihenfolge beim Beobachter ankommt.

Bei der zweiten Simulation wurde das Endoskop gequetscht. Die vier Fasern liegen in Abbildung 8b zu eng zusammen, sodass die Lichtstrahlen von einer Faser in die andere wechseln können, da kein Spalt mit anderem Material, wie etwa einem Kleber, mehr zwischen ihnen liegt. Der Übergang von einer Faser zur anderen weist keinen Unterschied des Brechungsindex auf, weshalb die Lichtstrahlen nicht mehr totalreflektiert werden. In der Abbildung erkennt man, dass beispielsweise die gelben Lichtstrahlen durch alle vier Fasern treten.

In der dritten Simulation wurde bei der Reparatur des Endoskops nicht sachgemäß gearbeitet. Die Fasern des Geräts wurden mit Klebstoff aneinander befestigt, der denselben Brechungsindex hat wie die Glasfasern selbst. Daher tritt nicht überall dort Totalreflexion auf, wo es sein sollte. Die Folge ist, dass fast kein Licht mehr beim Beobachter auf der rechten Seite ankommt. Es trifft bereits vorher auf die Ummantelung, von der es nicht zurückgeworfen wird. Zur Lösung des Problems muss zunächst die Klebestelle gefunden werden. In Abb. 8c ist sie als helles Oval angedeutet. Anschließend gilt es einen geeigneten Klebstoff zu wählen. Das heißt, dass der Brechungsindex des Materials so geändert werden muss, dass der Bildleiter wieder funktioniert.

In einer vierten Simulation (hier ohne Abbildung) müssen sich die Schüler mit einem Produktionsfehler beschäftigen. An einer Faser tritt Licht seitlich aus, so dass nur wenig grünes Licht

beim Beobachter ankommt. An der Faser, in der das grüne Licht weitergeleitet wird, ist die Oberfläche an einer Stelle so verändert, dass der Winkel, in dem die Lichtstrahlen auftreffen, zu steil wird. Dies gilt es zu finden und die Faser zu glätten.

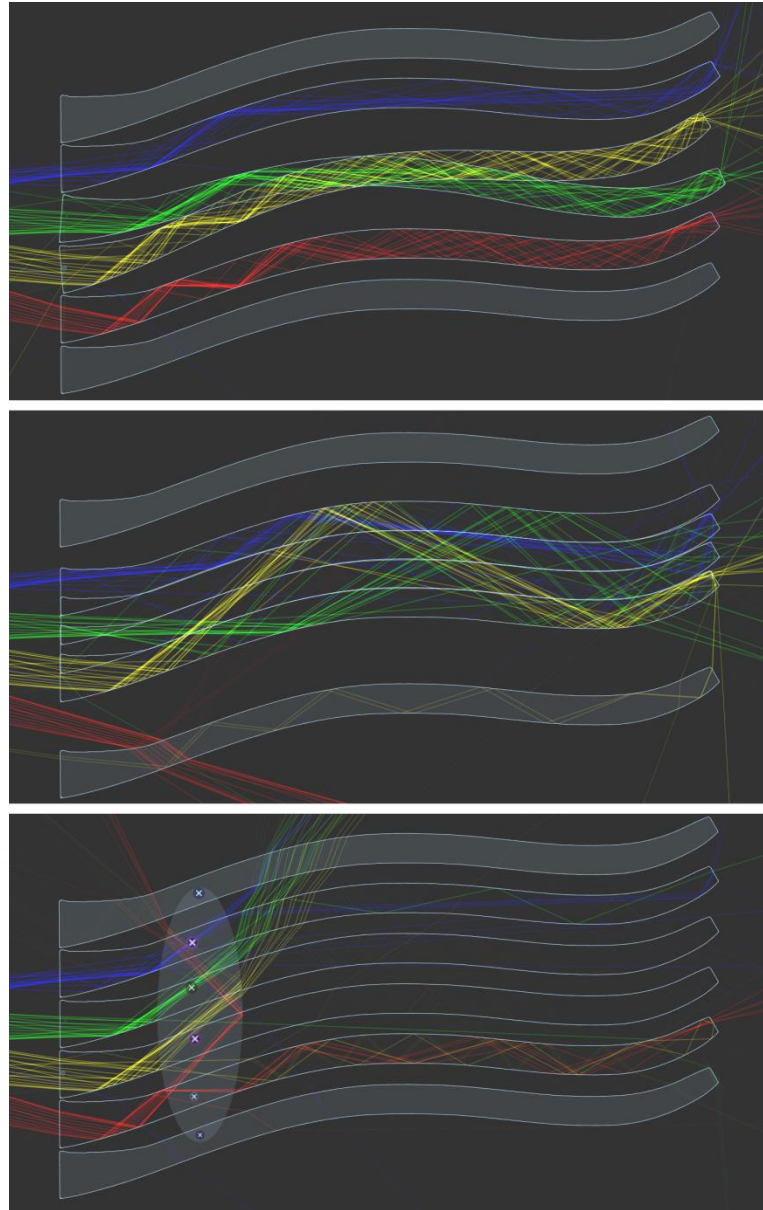


Abb. 8: Drei verschiedene Defekte des Glasfaser-Endoskops:
a) Lichtleiter am Ausgang in falscher Reihenfolge
b) Fasern berühren sich ohne trennendes Material
c) Klebstoff zwischen den Fasern mit falschem Brechungsindex

6. Fazit

Es wurde deutlich, dass Schüler mit einem Simulationsbaukasten an optischen Anordnungen spielen und experimentieren und dabei physikalische Gesetzmäßigkeiten und technische Anwendungen lernen können. Zum Teil ist es sinnvoll, gewisse Anordnungen vorzugeben, die die Schüler dann verändern können. Wie beim Experimentieren an realen Objekten sind auch hier konkrete Arbeitsanweisungen z.B. in Form eines Arbeitsblattes notwendig. Entgegen realer Anordnungen kann der gesamte Verlauf aller Lichtstrahlen gesehen werden, was in der Realität nur möglich ist, wenn sich ein streuendes Material im Lichtweg befindet. Außerdem können Aspekte leicht verändert werden, die sich in Realität nicht oder nur schwer ändern lassen.

Literatur

- [1] <http://www.design-simulation.com/IP/index.php>
- [2] <http://www.yenka.com/de/Home>
- [3] <http://www.algodoo.com>
- [4] Zang, M.; Wilhelm, T.: Modellieren ohne Mathematik mit Algodoo - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 62, Nr. 2, 2013, S. 37 – 40
- [5] Geßner, T.; Wilhelm, T.: Der Regensensor im Unterricht – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 57, Nr. 1, 2008, S. 24 - 31
- [6] Wilhelm, T.; Zang, M.: Das Glitzern der Brillanten - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 60, Nr. 8, 2011, S. 12 – 17
- [7] Z.B. bei Edmund Optics GmbH, www.edmundoptics.de, Bestellnummer 53-847, 114 €
- [8] Koppelman, G.; Rehnert, H.: Demonstrationsversuche zur Totalreflexion und zur Lichtleitung in optischen Fasern - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 38, 1989, Nr. 2, S. 9 - 14
- [9] Koppelman, G.; Rehnert, H.: Experimente mit Lichtleitfasern und technische Anwendungen - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 38, 1989, Nr. 2, S. 15 - 22

Online-Ergänzung

Die Algodoo-Simulationen findet man in der Algobox unter dem Stichwort „Totalreflexion“: www.algodoo.com/algobox/.

Anschrift der Verfasser

Michael Wenzel, Prof. Dr. Thomas Wilhelm, Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main, wenzel@physik.uni-frankfurt.de, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de; www.thomas-wilhelm.net.

Stichworte

Totalreflexion, Simulation, Regensensor, Brillant, Endoskop, Glasfaser, Technik

Kurzfassung

Ein Simulationsbaukasten wie Algodoo bietet mehr Experimentier- und Variationsmöglichkeiten als klassische vorgefertigte Simulationen, da alle Objekte frei bewegt und deren physikalische Eigenschaften geändert werden können. Dies wird an mehreren Simulationen gezeigt, in denen die Totalreflexion auftritt. Beispiele sind der Regensensor im Auto, Umlenkprismen, ein Rückstrahler, der Brillant und das Glasfaser-Endoskop. Es wird jeweils die Simulation vorgestellt sowie aufgezeigt, was Schüler oder Lehrkräfte damit ausprobieren können.