

Das Glitzern der Brillanten

Thomas Wilhelm, Markus Zang

1. Feiern mit Schmuck

Zu einer Feier haben sich Menschen schon immer gerne Schmuck angelegt. Edelsteine oder Diamanten funkeln dann im Licht, was uns offensichtlich gefällt. Aus dem gleichen Grund sind Weingläser, Kerzenständer oder Kronleuchter aus Kristallglas. Aber warum funkelt es? Für die Antwort konzentrieren wir uns auf den Diamanten, der seit über 2.000 Jahren begehrt ist, ein Sinnbild für Schönheit, Seltenheit, Beständigkeit und Kostbarkeit ist und von einem geheimnisvollen Mythos umgeben ist. Dabei sind es doch nur die physikalischen Eigenschaften der Härte, der Totalreflexion (infolge einer sehr hohen Brechzahl von 2,4) und der Dispersion, die den Diamant zu einem besonders wertvollen Material machen.

2. Der Brillant

Ein Brillant ist ein Diamant, der durch das Schleifen eine spezielle Form bekommen hat. Der moderne Brillantschliff wurde um 1910 entwickelt und es gibt heute unterschiedliche Varianten. Durch diesen Schliff sieht der Brillant von oben kreisrund aus. Er besitzt im Oberteil, das aus der Fassung heraussteht, in der Mitte eine große ebene Fläche und dann mindestens 32 schräge Facetten. Der untere spitze Teil, der in der Fassung verschwindet, besitzt mindestens 24 Facetten [1]. Diese Brillantform ist eine besonders charakteristische und für Diamanten die mit Abstand häufigste



Abb. 1: Dreidimensionales Glasmodell eines Brillanten

Schliffform. Im Internet erhält man unter dem Suchbegriff "Glas-Diamant" Modelle aus Glas in verschiedenen Größen und verschiedenen Glasfarben (Ø 8 cm, ca. 5 €, Ø 5 cm für ca. 3 €) (siehe Abb. 1).

Der Brillant zeichnet sich durch hohe Brillanz und großes Feuer aus. Je mehr Licht von einem Edelstein in Richtung des Betrachters gebrochen, reflektiert und totalreflektiert wird, desto höher ist die Brillanz. Äußere Brillanz oder Glanz entsteht durch direkte Spiegelung an der Oberfläche des Edelsteins, während innere Brillanz durch die Reflexion und Totalreflexion an

den Innenflächen entsteht. Bei manchen Edelsteinen erhält man durch spezielle Schliffe ausgewählte Richtungen, in denen ein besonders heller Lichtstrahl fällt. Wenn sich nun die Lichtquelle oder der Edelstein bewegen, trifft ein Strahl nur kurz in das Auge des Beobachters; es treffen ständig andere Lichtstrahlen in das Auge des Beobachters, der Stein „funkelt“ so auffallend.

Tritt wie beim Diamanten bei der Brechung an den Flächen eine große Dispersion auf, gibt es keine stark gebündelten Strahlen. Dafür wird das weiße Licht, das auf den Diamanten fällt, in seine Farben zerlegt und der Beobachter sieht viele bunte Lichtpunkte, die sich bei der Bewegung des Diamanten verändern. Dieses Farbspiel wird auch „Feuer“ genannt und ist beim Brillanten durch den speziellen Brillantschliff besonders groß.

3. Brillantmodelle im Physikunterricht

Im Physikunterricht bietet sich die Behandlung des Brillanten und seines Glitzerns als Anwendung der Totalreflexion an, wobei man auf die Dispersion nicht eingeht. Man kann problematisieren, warum ein Brillant so keilförmig geschliffen wird, dass fast der ganze Brillant in der Goldfassung verschwindet und nur ein kleiner Teil heraussteht. Außerdem kann man fragen, warum man von dem Gold unter dem Diamanten kaum etwas sieht, wenn man in den Diamanten schaut.

3.1 Acrylglasstücke von Lehrmittelfirmen

Um den Verlauf von Lichtstrahlen zu zeigen, ist ein Modell sinnvoll. Ein großes gegenständliches Modell leidet allerdings darunter, dass es nicht die hohe Brechzahl von 2,4 haben kann, da wir nur billigere Materialien verwenden können. Dennoch kann man ein paar wenige Aspekte auch mit einfachen Acrylglasprismen von Lehrmittelfirmen zeigen. Diese gibt es mit weißer Rückseite und sie sind magnetisch für eine Tafel. Am Besten verwendet man eine weiße Tafel oder ein weißes Papier als Hintergrund.

Ein flaches Acrylglasprisma mit einem 90° -Winkel (siehe Abb. 2) kann einen Schnitt durch einen Brillanten darstellen. Lässt man Laserlicht von der Laser-Ray-Box oder von einer Laserwasserwaage [2] senkrecht auf die Hypotenuse fallen, wird der Lichtstrahl im Inneren zweimal total reflektiert und verlässt

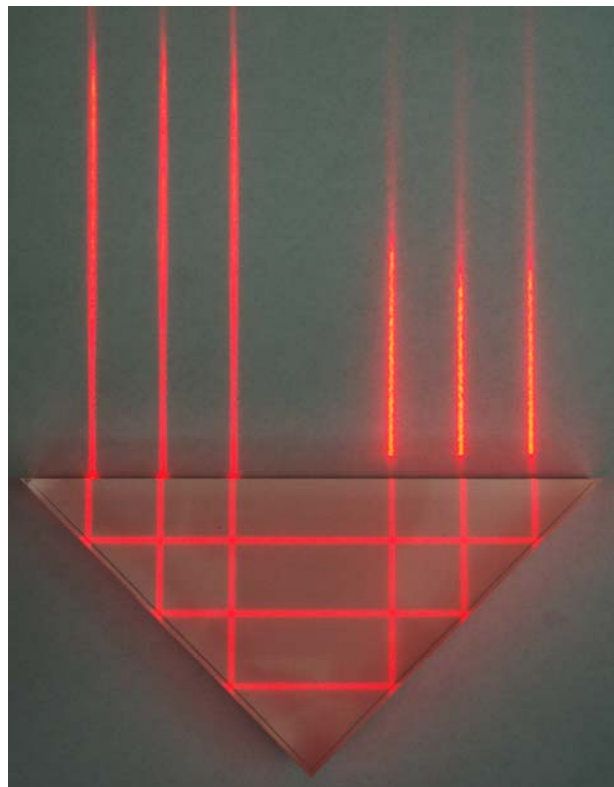


Abb. 2: Zweidimensionales Glasprisma einer Lehrmittelfirma als Modell eines Brillanten

das Brillantmodell wieder durch die Oberseite (siehe Abb. 2). Ein minimales Drehen des Modells bewirkt, dass der Lichtstrahl in eine andere Richtung gelenkt wird. Beim Hin- und Herdrehen fällt in ein Auge, das sich in einer bestimmten Richtung befindet, kurz ein Lichtstrahl, ein Funkeln wird wahrgenommen. Im Gegensatz zum echten Brillanten geht aber bei größeren Drehwinkeln die Totalreflexion verloren.

Als Modell eines falsch geschliffenen Brillanten kann man ein flaches Acrylglasprisma mit einem 60° -Winkel (siehe Abb. 3) verwenden. Hier wird der Lichtstrahl nicht zweimal total reflektiert, sondern würde die Goldfassung beleuchten.

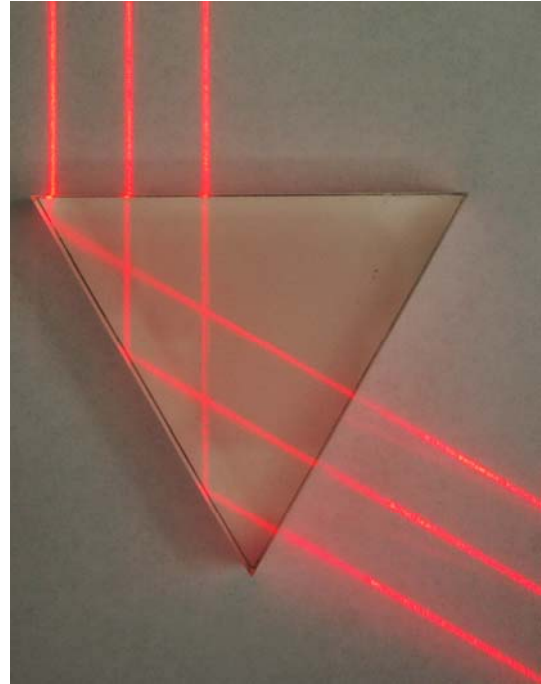


Abb. 3: Zweidimensionales Glasprisma einer Lehrmittelfirma als Modell eines falsch geschliffenen Brillanten

3.2 Ein selbst gemachtes Acrylglasmodell

Ein schöneres Modell eines Brillanten kann man sich selbst herstellen, indem man eine Acrylglasplatte aus dem Baumarkt an einer Kreissäge zuschneidet [2]. Dann werden mit immer feinerem Schleifpapier bis hin zur Schleifpaste die Seiten ganz glatt geschliffen. Richtet man nun wieder die Laserstrahlen auf das Modell, sieht man, wo diese das Modell verlassen. Der Weg im Inneren ist nicht zu sehen, da das Licht auf seinem Weg die hintere Fläche aufgrund von Totalreflexion nicht verlassen kann und die Unterlage nicht beleuchten kann.

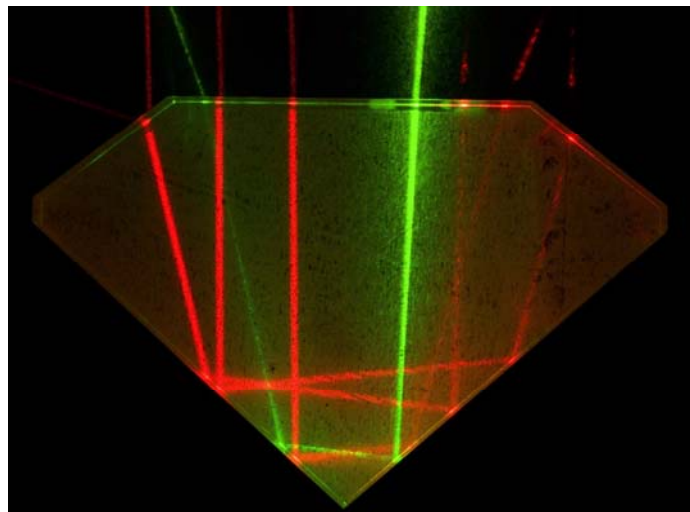


Abb. 4: Selbst hergestelltes, zweidimensionales Glasprisma als Modell eines Brillanten

Deshalb muss die Rückseite entweder mattiert werden, indem man sie mit feinem Schmirgelpapier zerkratzt, oder einfacher klebt man ein weißes Etikett auf die Rückseite. Nun ist der Weg des Lichtstrahles im Inneren und außerhalb des Modells zu sehen. Damit der Lichtweg im Vergleich zum Äußeren besser herauskommt, wurde das Modell in Abbildung 4 auf ein schwarzes Papier gelegt und an der Spitze noch ganz leicht angehoben. In Abbildung 4 kommen links oben drei rote Lichtstrahlen der Laser-Ray-Box parallel herein, die das Modell rechts oben in verschiedene Richtungen

verlassen. Rechts oben kommt das Licht eines grünen Laserpointers herein, das mit einem Glasrührstab aufgeweitet wurde und das Modell links oben wieder verlässt.

Da das Acrylglas einen zu kleinen Brechungsindex hat, funktioniert dies nur für bestimmte Einfallswinkel. Für andere Einfallswinkel tritt keine Totalreflexion mehr auf im Gegensatz zum echten Brillanten mit seinem hohen Brechungsindex.

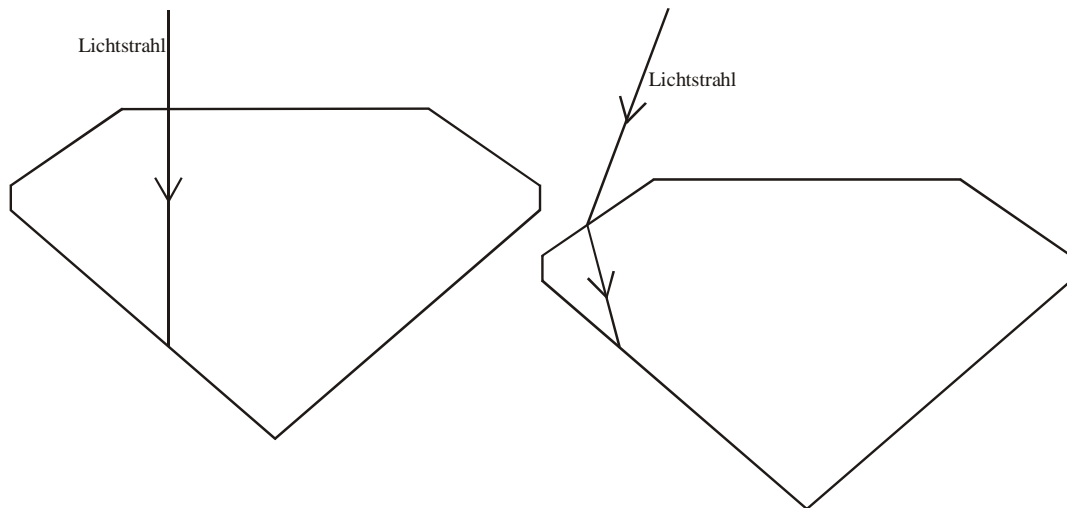
3.3 Arbeitsblatt zum Brillanten

Das am Experiment Besprochene kann nochmals mit einem Arbeitsblatt wie in Abbildung 5 vertieft werden. Dabei müssen die Schüler nur den Winkel des einfallenden Strahles zum Lot messen und entscheiden, ob es eine Totalreflexion oder eine Brechung nach außen gibt. Während beim korrekten Brillanten die Lichtstrahlen den Diamanten wieder nach oben verlässt, wird beim zu flach oder zu spitz geschliffenen Diamanten die Fassung beleuchtet.

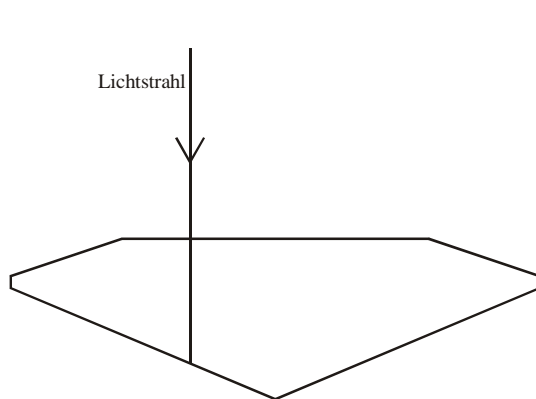
Das Glitzern des Brillanten

Zeichne genau den weiteren Verlauf der Lichtstrahlen in den Diamanten.
Beachte, dass der Grenzwinkel der Totalreflexion 24° ist.

Ein zum Brillanten geschliffener Diamant:



Ein flach geschliffener Diamant:



Ein spitz geschliffener Diamant:

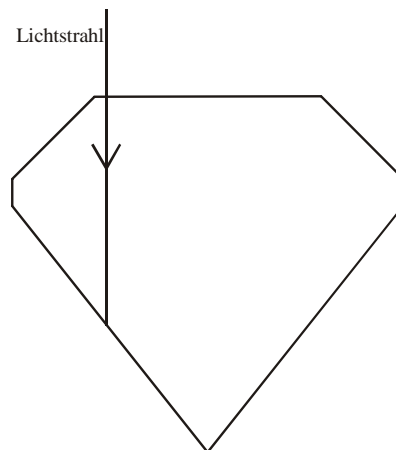


Abb. 5: Arbeitsblatt zum Brillanten

4. Simulationen zum Brillanten

Bei den obigen Glasmodellen besteht das Problem, dass sie den falschen Brechungsindex haben und deshalb einen größeren Grenzwinkel der Totalreflexion als Diamant. Mit echtem Diamant zu experimentieren ist dagegen aus Gründen der notwendigen Größe und natürlich aus Kostengründen nicht möglich. Deshalb bietet es sich hier an, eine Simulation zu verwenden. Eine Simulation dient der Nachbildung ausgewählter Realitätsaspekte der Wirklichkeit am Computer mit Hilfe einer (häufig nicht sichtbaren) Berechnung, wobei sich in der Regel einzelne Parameter verändern lassen oder man in den Ablauf eingreifen kann, so dass die Folgen der Handlung deutlich werden. Der Vorteil hierbei ist, dass der Anwender jederzeit verschiedenste Parameter der Simulation verändern kann. Dadurch kann man die Auswirkungen der Veränderungen direkt beobachten. Wie gut und wie detailgetreu eine Simulation die Wirklichkeit abbildet, hängt von der Qualität der verwendeten Software ab.

Beim Brillanten bietet es sich an, sich selbst eine Simulation mit einem Simulationsbaukasten zu erstellen. Man spricht dabei auch von virtuellen Welten. Diese Programme kennen die ganze Physik; der Nutzer muss nur die gewünschte Situation in einer zweidimensionalen Welt erstellen und charakteristische Größen festlegen, aber keine Gleichungen für physikalische Zusammenhänge eingeben.

Eines der ersten Programme dieser Art war „Interactive Physics“ [3-5], das aber nur für die Newtonsche Mechanik gedacht ist. Eine weitere Software dieser Art ist „Algodoo“ [6]. Algodoo ist die kostenpflichtige Nachfolgerversion der Freewaresoftware „Phun“ [7], die im Jahre 2007 erschien. Algodoo kann nicht nur Bewegungen simulieren, sondern auch Abläufe der Strahlenoptik. Die bekannteste Software dieser Art ist Crocodile Physics, die große Verbreitung fand [8]. Das Nachfolgeprogramm von Crocodile Physics heißt „Yenka Physik“ [9]. Yenka Physik beinhaltet vier Produkte, die miteinander funktionieren und sich eine Benutzeroberfläche teilen: Bewegung, Wellen und Optik, Elektrizität und Magnetismus sowie Elektronik. Die kostenlose Home-Lizenz von Yenka Physik funktioniert nur nach 15 Uhr.

Hier soll kurz auf beiden neueren Programme Algodoo und Yenka Physik eingegangen werden.

4.1 Die Idee vom Beispiel Algodoo

In Algodoo stehen dem Anwender verschiedene Werkzeuge zum Zeichnen von Objekten zur Verfügung wie zum Beispiel Rechtecke, Kreise oder Freihand. Man kann diese mit verschiedenen Geometrieoptionen noch bearbeiten und mit Achsen, Federn oder Motoren verbinden, um so komplexere Objekte zu erstellen. Die einzelnen Objekte besitzen verschiedene physikalische Eigenschaften wie Dichte, Masse, Reibungskoeffizienten usw., welche nach Belieben verändert werden können (siehe Abb. 6). Hierbei bedingen sich manche Veränderungen gegenseitig, so führt zum Beispiel eine Erhöhung der Dichte auch zu einer Erhöhung der Masse. Den Objekten können verschiedene Materialien zugewiesen werden, unter anderem Glas, was für die Simulation des Brillanten genutzt wird.



Abb. 6: Materialmenü für ein Rechteck in Algodoo

Hat man das Experiment erstellt, wird die Simulation durch Druck auf die Leertaste gestartet und die wirkenden Kräfte verursachen Bewegungen der Objekte. Algodoo berücksichtigt hierbei unter anderem Luftreibung, Auftriebskraft, Drehmomente und Elastizität. Dies ermöglicht es, in Algodoo zahlreiche physikalische Sachverhalte zu betrachten und dabei Parameter zu verändern und deren Auswirkungen zu beobachten. Es ist auch möglich, Wasser und dessen Verhalten zu simulieren. Die Software stellt es dann durch zahlreiche elastische Kügelchen dar. Diese Methode benötigt leider sehr viel Rechenleistung und überfordert schwächere PCs.

In dem Bereich der Optik ist es möglich, Laser zu verwenden, die einen Lichtstrahl aussenden. Trifft dieser auf ein gläsernes Objekt, wird er abhängig von der Brechzahl gebrochen. Die Farbe des Lasers ist hierbei ein Maß für die Wellenlänge, denn es wird sogar Dispersion berücksichtigt. Ein weißer Laser lässt sich mit einem Prisma aufspalten.

Eine weitere Möglichkeit in Algodoo ist, Graphen von Geschwindigkeit, Ort, Energien usw. anzeigen zu lassen und mit deren Hilfe die Simulation intensiver zu untersuchen. Auch die Möglichkeit, vorhandene Kräfte mittels Vektoren anzeigen zu lassen, bietet ein hohes Maß an Anschaulichkeit. So wurde in Abb. 7 die Gewichtskraft, die Normalkraft durch die Auflage, die Reibungskraft und die Gesamtkraft als Summe der Teilkräfte eingeblendet.

Obwohl sich die Anwendung von Algodoo eigentlich auf Mechanik und Optik beschränkt, können mit ein paar Tricks auch andere Physikbereiche simuliert werden. So kann beispielsweise die Anziehungskraft von Objekten als elektrische Kraft genutzt werden, da man dieser sowohl positive als auch negative Werte geben kann. Einfache Kugeln werden so zu Elektronen und Protonen. Weiter kann man mit der mächtigen Skriptsprache Thyme die Simulation tiefgreifend manipulieren und sogar einfache elektrische Schaltungen erstellen. Skripte werden in Algodoo durch Berührung von Objekten oder durch Berührung mit einem Laser ausgelöst. Um also Skripte in eine Simulation einzubauen, muss man im Hintergrund Laser verstecken, die das Ganze steuern. Um auf diese Weise Simulationen zu erstellen, für die Algodoo eigentlich nicht gedacht ist, ist einiges an Arbeit nötig sowie ausreichend Kenntnis über die Skriptsprache. Es ist somit zwar möglich, andere Gebiete der Physik zu simulieren, allerdings ist es kaum für den Unterricht zu empfehlen. Dafür sollte man auf andere Programme zurückgreifen, die für diese Gebiete gedacht sind.

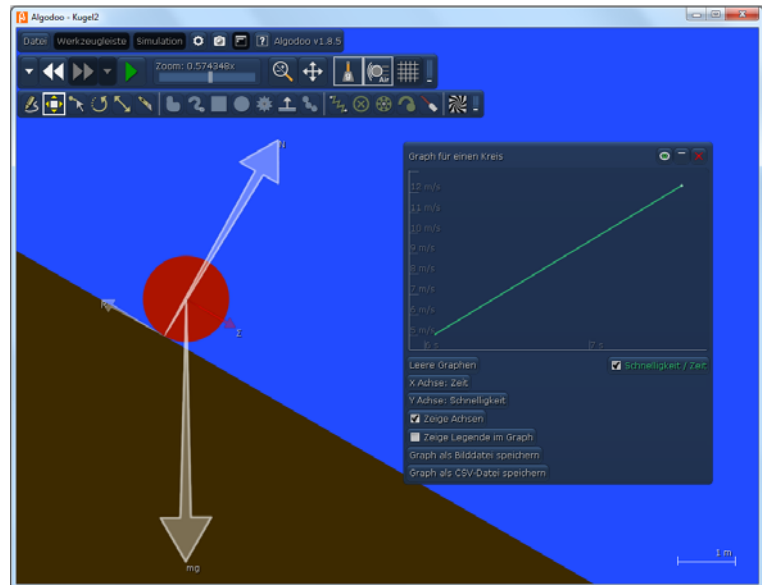


Abb. 7: Szene in Algodoo

4.2 Ein Brillant in Algodoo

Um nun die Reflexion eines Brillanten zu simulieren, muss zunächst ein Objekt in der entsprechenden Form erstellt werden. Hier lässt Algodoo leider die Option vermissen, Winkel zwischen Geraden zu zeichnen. Man erstellt deshalb zuerst ein Rechteck mit entsprechender Höhe und Breite und schließlich weitere Rechtecke, die als Schablonen dienen. Diese Schablonen dreht man nun mit dem „Drehe Objekte“-Werkzeug in die gewünschten Winkelpositionen und legt sie

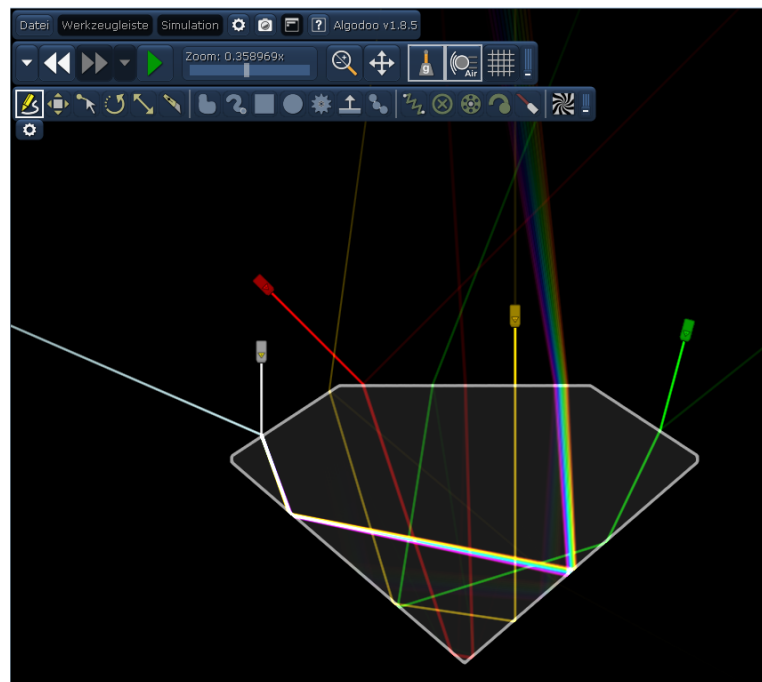


Abb. 8: Modell eines Brillanten in Algodoo

über das ursprüngliche Rechteck. Über „Rechtsklick → CSG → Differenz“ wird nun die Schablone vom darunterliegenden Rechteck abgezogen und kann danach gelöscht werden. Dies wird für alle vier schrägen Seiten wiederholt und man bekommt ein Objekt wie es in Abbildung 8 zu sehen ist.

Als nächstes wird dem Programm über „Rechtsklick → Material → Glas“ mitgeteilt, dass es sich hierbei um ein gläsernes Objekt handelt. Es ist nun lichtdurchlässig und das Licht wird an der Oberfläche gebrochen. Nun erhöht man im selben Untermenü den Brechungsindex des Materials auf 2,4 und das Modell eines Brillanten ist fertig.

Zum Schluss fügt man noch einen oder mehrere Laser hinzu, die man von oben in verschiedenen Winkeln in den Brillant einstrahlen lässt. Deren Strahlenverlauf kann man dann verfolgen. Wenn man nur auf die Totalreflexion, aber noch nicht auf die Dispersion eingehen will, darf das Laserlicht nicht weiß sein, da es sonst zur Dispersion im Brillanten kommt.

Mit der Simulation kann man nun verschiedene Aspekte des Brillanten verdeutlichen. Zum einen kann der Brechungsindex an einem Regler fließend verändert werden und man kann die Auswirkungen auf die Lichtstrahlen direkt beobachten. Des Weiteren kann man den Brillanten drehen und so den Einfallswinkel der Strahlen verändern. Mit dem „Streck“-Werkzeug kann man die Seitenverhältnisse und damit auch die Winkel im Brillanten verändern. Stimmen diese nicht mehr, reflektiert er das Licht nicht mehr komplett.

4.3 Ein Brillant in Yenka Physik

In Yenka Physik kann man ein Prisma so drehen und verziehen, dass man oben eine waagrechte Grenzfläche hat und unten einen Winkel von ca. 98° (siehe Abb. 9). Dass damit das Oberteil nicht beschnitten ist, kann toleriert werden. Als Material wird Diamant eingestellt; so wird der Brechungsindex für verschiedene Farben richtig verwendet.

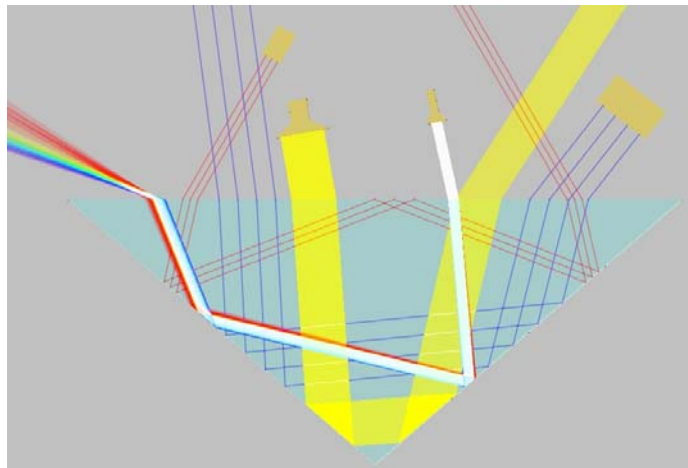


Abb. 9: Simulation eines Brillanten in Yenka Physik

Man kann dann Lampen positionieren, die ein paralleles Lichtbündel aussenden. Dabei kann man deren Winkel, deren Strahldicke und deren Lichtfarbe einstellen (in Abb. 9: ein dickes gelbes und ein dünnes weißes Lichtbündel). Außerdem kann man Laserboxen positionieren, die dünne Laserstrahlen aussenden. Dabei kann man neben dem Winkel und der Lichtfarbe auch die Anzahl der parallelen Laserstrahlen und deren Abstand einstellen (in Abb. 9: drei rote und vier blaue Laserstrahlen). So kann man spielerisch die unterschiedlichsten Strahlenverläufe ausprobieren.

Auch hier kann man Brechungsindex des Brillanten verändern. Außerdem lässt sich der Brillant leicht mit der Maus strecken oder stauchen, so dass man Situationen wie in Abbildung 5 erzeugen kann.

5. Fazit

Das Glitzern der Brillanten ist nicht nur faszinierend schön, sondern auch eine mögliche Anwendung der Totalreflexion im Physikunterricht. Dabei kann man sich dem Thema sowohl experimentell mit Acrylglasmodellen nähern, als auch mit modernen Simulationsbaukästen spielen.

Literatur

- [1] Wikipedia – Brillant
- [2] Wilhelm, Thomas: Brechung mit der Laserwasserwaage – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58, Nr. 1, 2009, S. 5 - 8
- [3] <http://www.design-simulation.com/IP/index.php>
- [4] Wolter, Lars: Einsatz von „Interactive Physics“ in der Lehre der Physik - In: Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung 1997, 1998
- [5] Wolter, Lars: Der Simulationsbaukasten "Interactive Physics". Einsatz in der Lehre der Physik, Herbert Utz Verlag, München, 1998
- [6] <http://www.algodoo.com>
- [7] <http://www.algodoo.com/wiki/Download> unter „Old Version“
- [8] Wilhelm, T.; Trefzger, T.: Erhebung zum Computereinsatz bei Physik-Gymnasiallehrer - In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Hannover 2010, www.phydid.de
- [9] <http://www.yenka.com/de/Home/>

Anschrift des Verfassers:

AR Dr. *Thomas Wilhelm, Markus Zang*, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de, www.thomas-wilhelm.net