

Die folgenden Original-Seiten der Zeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule“ wurden mit expliziter Genehmigung des Aulis-Verlages (Dr. Brigitte Abel) und des Friedrich-Verlages (Hubertus Rollfing) auf die Webseite www.thomas-wilhelm.net gestellt. Vielen Dank für die Erlaubnis.

Die exakte Quellenangabe des Zeitschriftenartikels ist:

GEßNER, T.; WILHELM, T.

Der Regensensor im Unterricht

Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 57, Nr. 1, 2008, S. 24 - 31

Der Regensensor im Unterricht

T. Geßner u. T. Wilhelm

1 | Begründung des Thema

● In einem Fahrzeug sind mehr als 20 Steuergeräte verbaut, die mit über 15 km Kabel untereinander und der Außenwelt verbunden sind. Doch woher bekommen die „Gehirne“ eines Autos die Informationen aus ihrer Umwelt? Dazu werden die Fahrzeuge mit immer mehr Sensoren, den Sinneszellen einer Maschine, ausgestattet: Airbagsensor, Sitzbelegungssensoren, Tank- und Ölfüllstandssensoren, Regensensoren und noch viele mehr – manche versteckt, manche gut sichtbar angebracht. In letzter Zeit sieht man immer mehr Regensensoren quer durch alle Fahrzeugklassen. Schon Ende der sechziger Jahre wurden erstmals Patentanmeldungen für Regensensoren eingereicht, aber erst 1994 wurde zum er-

sten Mal serienmäßig ein Regensensor, damals im Peugeot 406, angeboten. Nachdem die Technik dann zunächst vor allem Oberklassefahrzeugen vorbehalten war, ist sie mittlerweile auch in Kleinwagen wie zum Beispiel dem Renault Clio erhältlich. Bis zur serienmäßigen Ausstattung kompletter Pkw-Baureihen auch im Kleinwagensegment wird es aber noch einige Jahre dauern. In diesem Artikel soll die prinzipielle Arbeitsweise eines Regensensors und die Physik hinter dem Sensor, die Totalreflexion und ihre Aufhebung, genauer betrachtet werden und Vorschläge für die Behandlung im Physikunterricht dargelegt werden. Mit einem solchen direkten Bezug zur Alltagswelt kann die Physik für Schüler motivierend sein, denn das Auto hat heute für unseren Alltag eine große Bedeutung. Dabei

ist der Regensensor nicht nur eine Anwendung eines physikalischen Effekts, sondern kann sogar zentraler Lerngegenstand der geometrischen Optik im Anfangsunterricht sein [1].

2 | Das physikalisch-technische Funktionsprinzip

● Bei den Regensensoren kann man zwischen zwei grundlegend verschiedenen Funktionsweisen unterscheiden: die optoelektronischen Sensoren, die die Reflexion von Licht am Medienwechsel ausnutzen, und die kapazitiven Sensoren, bei denen die Regentropfen als Dielektrikum die Kapazität eines Kondensators ändern. Beide Sensoren werden heute verwendet, aber in völlig verschiedenen Situationen. Der kapazitive Regensensor wird stationär verwendet, z. B. als Markisensteuerung, der optoelektronische Regensensor wird hauptsächlich in Fahrzeugen zur Steuerung der Scheibenwischereinheit genutzt. In diesem Artikel wird nur auf die Funktionsweise des „optischen“ Regensensors eingegangen (siehe Abb. 1 und 2). Die Arbeitsweise des kapazitiven Sensors wird in [2] beschrieben.

Der Regensensor in Fahrzeugen nutzt die Reflexion, genauer gesagt die Totalreflexion von Licht beim Medienübergang. Die zentralen Bausteine eines solchen Regensensors sind eine Lichtquelle, der Übergang Glas-Luft bzw. Glas-Wasser und ein Lichtdetektor. Als Lichtquellen werden typischerweise Leuchtdioden (siehe Abb. 3) eingesetzt, welche im nicht sichtbaren IR-Bereich emittieren. Ein Linsensystem (siehe Abb. 4) weitet die Strahlen (im Sensor des Fotos: vier) auf, so dass eine möglichst große Fläche gleichmäßig beleuchtet wird. Dieses Lichtbündel wird über ein Prismensystem so umgelenkt, dass es auf die Frontscheibe trifft.

Besonders wichtig ist dabei die gute und saubere Ankopplung des Sensors an die Innenseite der Frontscheibe. Diese erfolgt über ein transparentes Silikonkissen (siehe Abb. 5), welches zwischen dem Kunststoffprismensystem und der Glasscheibe liegt und verhindert, dass sich ein Luftspalt an der Ein-, aber auch der Auskopplungsstelle zwischen Sensor und Glas bildet. Dazu wer-

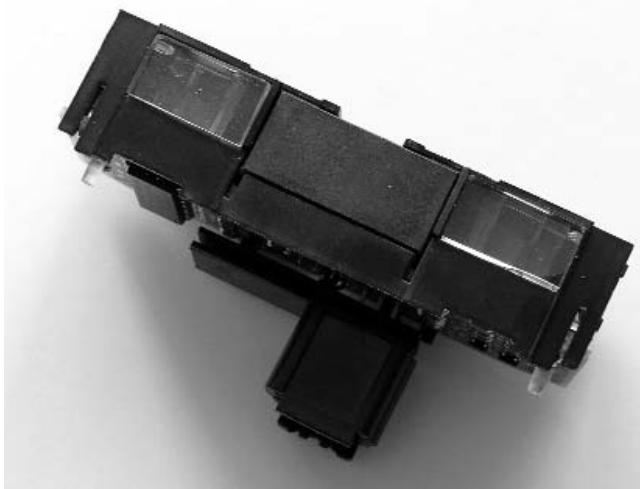


Abb. 1: Foto eines ausgebauten Regensensors

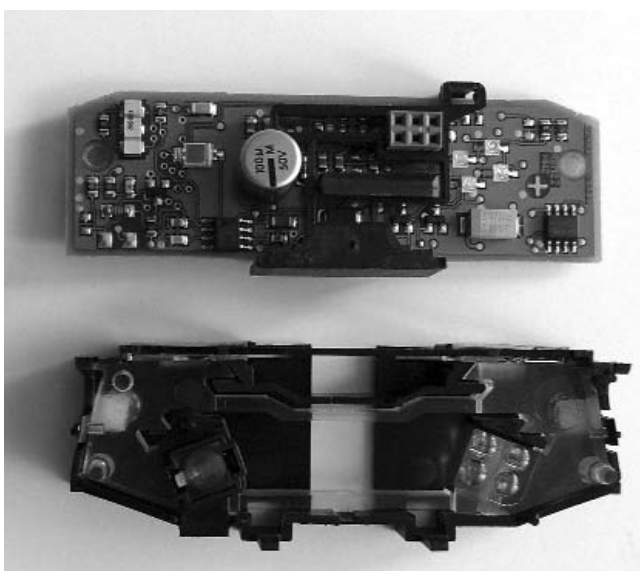


Abb. 2: Foto eines geöffneten Regensensors

den zwei weiche Silikonplättchen durch die Befestigung des Sensors an der Frontscheibe sowohl an den Regensensor als auch an die Frontscheibe gepresst. So entsteht nur an den beiden Ankopplungsstellen ein guter optischer Kontakt zur Scheibe, an den anderen Stellen hat sich ein kleiner Luftspalt zwischen Sensor und Fensterscheibe ausgebildet. Um dies sicherzustellen, gibt es einen kleinen Abstandshalter (siehe Abb. 5). Durch das Prismensystem und das Silikonkissen soll das Licht nicht nur einfach gut in die Glasscheibe eingekoppelt werden, sondern auch noch unter einem bestimmten Winkel α_{gr} auf die Grenzfläche „Glas-Luft“ der Scheibenvorderseite treffen. Dieser Winkel α_{gr} ist der Grenzwinkel der Totalreflexion für die beiden Medien „Frontscheibe“ und „Luft“. Mit Hilfe des Gesetzes von Snellius

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{n_2}{n_1}$$

(siehe Abb. 6) und der Bedingung, dass der Reflexionswinkel $\beta = 90^\circ$ ist (der Lichtstrahl verlässt gerade nicht mehr das Medium) (siehe Abb. 7), ergibt sich der Grenzwinkel α_{gr} zu

$$\alpha_{gr} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1} \cdot \underbrace{\sin(90^\circ)}_1\right) = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Mit den Brechungsindizes für das Glas der Frontscheibe $n_1 = 1,5$ und für Luft $n_2 = 1$ ergibt sich hier ein Grenz- und damit auch ein minimaler Einstrahlwinkel von $\alpha_{gr} = 41,8^\circ$. In diesem Fall ist das Licht in der Frontscheibe „gefangen“, da sowohl auf der Vorder- als auch auf der Rückseite der Frontscheibe ein Medienwechsel von Glas nach Luft stattfinden müsste, aber aufgrund des Einfallswinkels des Lichtstrahls dieser total reflektiert wird. Der Lichtstrahl läuft im Zickzack durch die Frontscheibe, bis er auf die Auskopplungsstelle, d. h. das zweite Silikonkissen trifft und dort aus der Frontscheibe ausgekoppelt wird, da hier für den Übergang „Glas nach Silikon“ die Totalreflexionsbedingung nicht erfüllt ist (siehe Abb. 8). Der ausgekoppelte Lichtstrahl wird weiter durch ein zweites Prismensystem zur Detektoreinheit umgelenkt. Dieser Detektor muss nicht nur erkennen, ob sondern auch wie viel Licht von der Sendeleuchtdiode ankommt. Durch ein Linsen-Filter-System wird das Licht der ausgesendeten Wellenlänge auf den Detektor fokussiert.

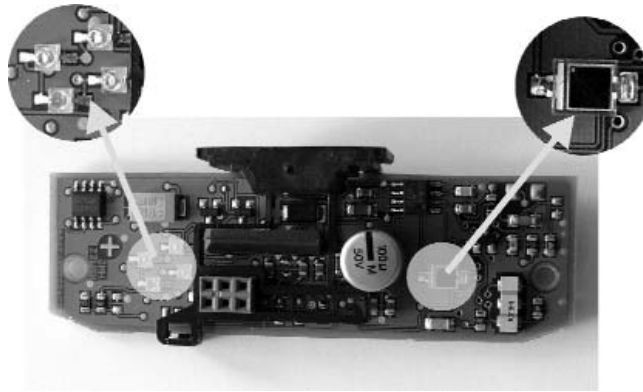


Abb. 3: Die Platine des Regensensors mit Sendeleuchtdioden (links) und Photodiode (rechts)



Abb. 4: Prismensystem des Regensensors mit Linsen zur Strahlaufweitung (links), Linse zur Fokussierung auf den Sensor (rechts) und dem Filter (oben)



Abb. 5: Detailaufnahme eines Silikonkissens mit Abstandshalter rechts

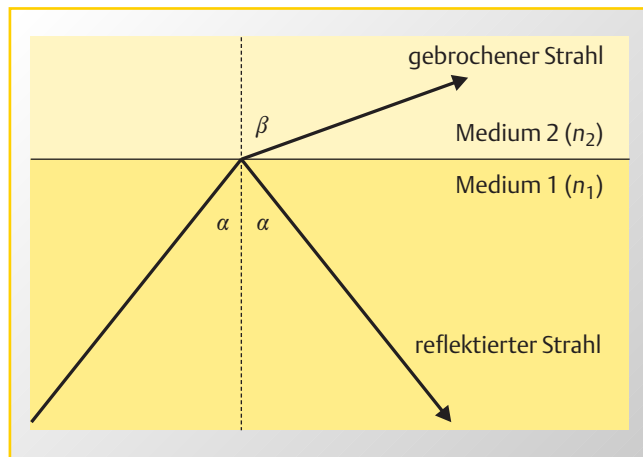


Abb. 6: Skizze zum Gesetz von Snellius

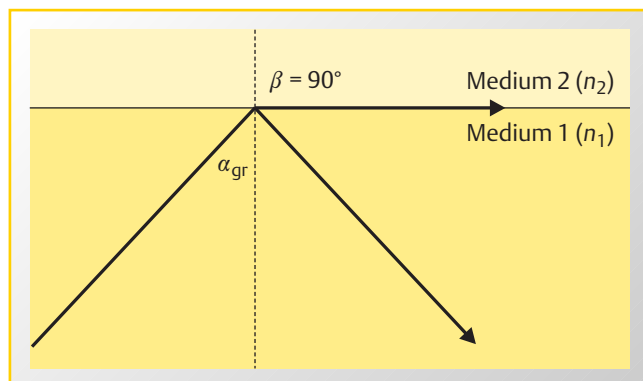


Abb. 7: Skizze zum Grenzwinkel der Totalreflexion

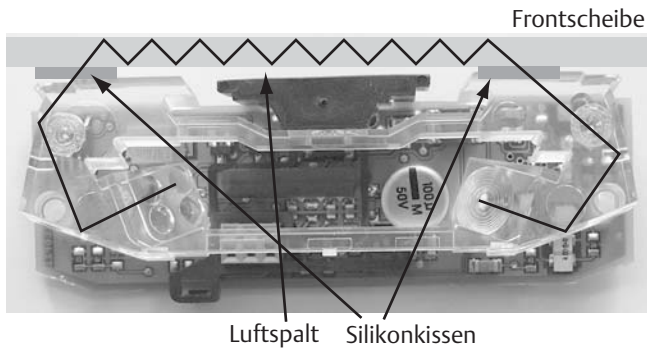


Abb. 8: Theoretischer Strahlverlauf im Regensensor und der Frontscheibe bei trockenen Verhältnissen

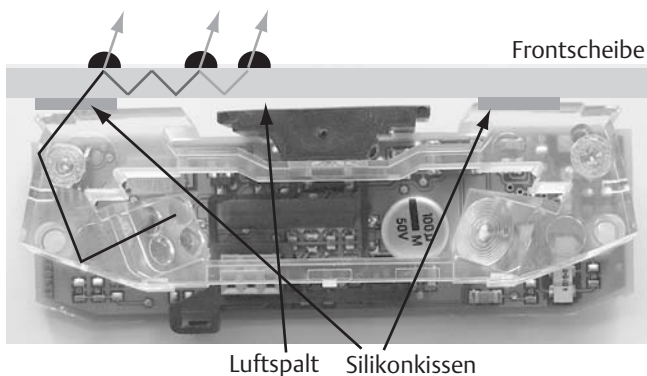


Abb. 9: Theoretischer Strahlverlauf im Regensensor und der Frontscheibe bei Regen

Als Empfänger kann sowohl ein Phototransistor als auch eine Photodiode oder ein CCD-Chip (Charge-Coupled Device oder ladungsgekoppeltes Bauteil) verwendet werden. Bei der Photodiode (siehe Abb. 3) und dem Phototransistor wird durch die Anzahl der auftreffenden Photonen die Leitfähigkeit geändert, beim CCD-Chip ändert sich die Kapazität in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke. In beiden Fällen erhält man ein Signal, welches proportional zur Stärke des einfallenden Lichts ist.

Bei einsetzendem Regen ändert sich die Situation auf der Frontscheibe grundsätzlich. Durch die Regentropfen, die sich auf der Frontscheibe niederschlagen, verändert sich an manchen Stellen der mögliche Medienwechsel für das Licht. Nicht mehr nur der Übergang „Glas-Luft“, sondern auch der Übergang „Glas-Wasser“ ist nun zu beobachten. Durch die Brechzahl von Wasser ($n = 1,33$) und den sich daraus ergebenden Grenzwinkel $\alpha_{gr} = 62,5^\circ$ für den Übergang „Glas-Wasser“ ist die Totalreflexionsbedingung hier nicht mehr erfüllt und ein Teil des Lichts wird gebrochen und verlässt die Frontscheibe, weswegen es nicht mehr den Detektor erreicht und dort ein Signalabfall zu beobachten ist (siehe Abb. 9). Damit kann die Elektronik auf den einsetzenden Regen reagieren.

Den Anteil der gebrochenen Strahlung bei einer Brechung bei einem Wassertropfen lässt sich berechnen. Mit Hilfe der fresnel-

schen Formeln [3] erhält man einen Zusammenhang zwischen der Intensität der einfallenden und der reflektierten Strahlung für unpolarisiertes Licht:

$$r = \frac{I_{ref}}{I_{ein}} = \frac{\pi^2 + \sigma^2}{2}$$

mit parallel zur Grenzfläche polarisierten Anteil

$$\pi = \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)},$$

dem senkrecht zur Grenzfläche polarisiertem Anteil

$$\sigma = -\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)}$$

und der Beziehung zwischen Einfallswinkel und Ausfallswinkel

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{n_2}{n_1}$$

In unserem Fall beim Übergang von Glas nach Wasser mit einem Einfallswinkel von $\alpha = 41,8^\circ$ und den beiden Brechungsindizes $n_{Glas} = 1,5$ und $n_{Wasser} = 1,33$ werden bei der Brechung weniger als 1 % der einfallenden Strahlung reflektiert und damit mehr als

99 % gebrochen und sind damit für den Detektor verloren (siehe Abb. 6). Auch wenn man davon ausgeht, dass man kein ideal paralleles Lichtbündel zur Verfügung hat, kann man davon ausgehen, dass der reflektierte Anteil der Strahlung deutlich unter 10 % ist. Bei mehreren Wassertropfen kommt entsprechend viel weniger an.

Da das ausgesendete Lichtbündel eine geometrische Ausdehnung besitzt, kann der Regensensor nicht nur zwischen „nass“ und „trocken“ unterscheiden, sondern sogar ein Signal liefern, welches von der Regenintensität abhängt. Regnet es nur wenig, so wird nur ein kleiner Anteil der Frontscheibe befeuchtet und somit nur ein kleiner Anteil des Lichtbündels gebrochen. Statistisch und auch idealerweise gilt: Der Anteil der benetzten Oberfläche an der Gesamtoberfläche ist gleich dem Anteil der gebrochenen Strahlung an der Gesamtstrahlung. Je feuchter die Frontscheibe ist, desto mehr Licht wird gebrochen, desto weniger Licht erreicht den Detektor. Somit erhält man ein Signal, welches von der Regenintensität abhängig ist und z. B. zur Wischgeschwindigkeitssteuerung eingesetzt werden kann. Eine mögliche Fehlerquelle bei einem Regensensors ist Kondenswasser, welches

Abb. 10: In Fahrzeug unter dem Rückspiegel eingebauter Regensensor

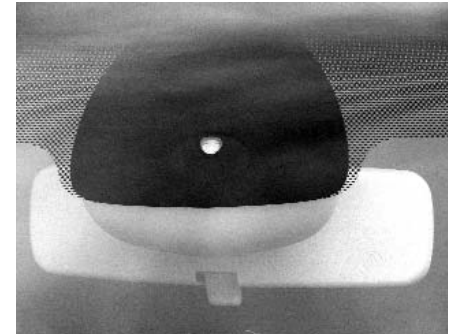
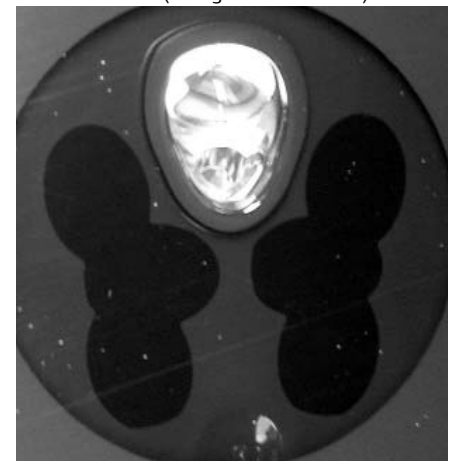


Abb. 11: Detailaufnahme eines Rückspiegelfußes mit Regensensor (dunkle Stellen rechts und links) und Lichtsensors (mittig oben und unten)



sich auf der Innenseite der Autoscheibe im Sensor niederschlägt. Da dabei genau wie bei Regentropfen auf der Vorderseite der Scheibe die Totalreflexionsbedingung für den Medienwechsel nicht mehr gegeben ist, wird Licht gebrochen und damit gekoppelt. Um diese Kondensbildung zu vermeiden, wird der Sensor geheizt. Um die Informationen des Regensensors noch zuverlässiger zu machen, werden meist mehrere Sensoren parallel zueinander verwendet und die von ihnen gelieferten Informationen von der Elektronik ver- und abgeglichen.

Der Regensensor wird üblicherweise im Fuß des inneren Rückspiegels des Fahrzeugs untergebracht (siehe Abb. 10), um die Sicht des Fahrers möglichst wenig zu beeinflussen. Um den Sensor auch von außen zu „verstecken“ wird dieser Teil der Windschutzscheibe dunkel eingefärbt. Dies beeinflusst die Funktion des Regensensors nicht, da die Scheibe trotzdem für das verwendete Infrarotlicht durchsichtig ist. Würde der Regensensor mit sichtbarem Licht arbeiten, könnte er nicht so abgedeckt werden. Oft ist auf den Frontscheiben im Bereich des Spiegelfußes trotzdem ein „durchsichtiger“ Teil zu sehen (siehe Abb. 11). Dabei handelt es sich um einen Helligkeitssensor, welcher oft mit Regensensoren kombiniert wird und zur Lichtsteuerung des Fahrzeugs verwendet wird.

3 | Der Regensensor im Unterricht

3.1 Die Totalreflexion im Unterricht

Die Totalreflexion, die für den optischen Regensensor entscheidend ist, gehört zur Strahlenoptik, die auch geometrische Optik genannt wird und von der Prämisse bzw. dem Modell ausgeht, dass sich Licht in Form von Lichtstrahlen in einem homogenen Medium geradlinig ausbreitet. Die Strahlenoptik wird bereits sehr frühzeitig im Physikunterricht behandelt, da die direkte Wahrnehmbarkeit optischer Phänomene die Möglichkeit bietet, Erscheinungen aus der Erfahrungswelt der Schüler zu beobachten und zu beschreiben.

Zwei wesentliche Eigenschaften 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.

Gerade bei der Totalreflexion könnte man die Grenzen der Strahlenoptik mit einfachen Experimenten deutlich machen. Es tritt nämlich doch – entgegen der Vorstellung der Strahlenoptik – Licht in die Grenzschicht des zweiten Mediums ein und es läuft eine Oberflächenwelle parallel zur Grenzfläche. Gibt es im dünneren Medium eine Absorption, nimmt die Intensität des reflektierten Strahles ab. Diese Oberflächenwelle wird außerdem durch Staub oder Rauigkeiten auf der Grenzfläche erheblich gestreut. Wird der Strahlungsanteil im optisch dünneren Medium nicht gestört, tritt er seitlich versetzt wieder in das optisch dichtere Medium ein, was eine nachweisbare seitliche Versetzung des reflektierten Strahls bewirkt (Goos-Hänchen-Effekt) [4]. Diese Welleneffekte bleiben in der Schule unerwähnt, sind aber für eines der nachfolgenden Experimente wichtig (siehe 3.2). In den meisten Schulphysikbüchern werden als Anwendung der Totalreflexion Luftspiegelungen behandelt, da diese sehr faszinierend sind. Das Problem ist aber, dass es sich genau genommen nicht um Totalreflexion handelt, sondern um eine kontinuierliche Lichtstrahlbrechung, denn der Brechungsindex ändert sich nicht in einer Stufe, sondern kontinuierlich, was zu gebogenen Lichtstrahlen führt [5]. 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 und die Reflexion dabei entscheidend besser als bei Glasspiegeln ist (90° -Umlenkprisma, 180° -Umkehrprisma,

geradsichtiges Wendepisma) [6]. Da die Umlenkung der von Spiegeln entspricht, ist das keine motivierende Anwendung. Die wohl wichtigste Anwendung der Totalreflexion ist die Lichtübertragung durch Faseroptik, also Lichtleitfaser aus Glas oder durchsichtigem Kunststoff. Generell kann man hier unterscheiden zwischen Einzelfasern zur Signalübertragung, ungeordneten Faserbündeln zur Beleuchtung und geordneten Faserbündeln zur Bildübertragung [7, 8, 9]. Auch in der Windschutzscheibe des Autos geschieht eine Lichtleitung ähnlich wie in einer einzelnen Glasfaser, so dass man beides gleichzeitig thematisieren könnte.

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Arten, Lichtstrahlen sichtbar zu machen. Die eine Möglichkeit ist, den Lichtstrahl, z. B. einen Laserstrahl, durch ein Medium zu schicken, das einen Teil des Lichtes nach allen Seiten streut. Dies ist möglich mit Wasser, das wenige Streuteilchen wie Fetttropfchen von Milch enthält, oder mit einem selbst gefertigten Gelatineblock (siehe Abschnitt 3.2) oder mit Streuteilchen in Luft (Rauch oder Nebel aus einer Disco-Nebelmaschine oder mit Hilfe eines Dichtepfuges eines Gasinstallateurs oder mit vernebeltem Wasser mit Hilfe eines Ultraschallwasserverdampfers). Die andere Möglichkeit ist der streifende Lichteinfall eines Lichtfächers. D. h., es wird die Schnittlinie zwischen einer Lichtebeine und einem Schirm sichtbar, die man als Lichtstrahl interpretiert. Hierzu kann man Licht einer Glühbirne durch eine Schlitzblende gehen lassen oder einen Laserstrahl durch einen Glasrührstab (der eine zylinderförmige Sammellinse mit sehr kleiner Brennweite ist) zu einem Lichtfächer aufweiten. Am häufigsten verwendet wird sicher die Schlitzblende vor der Glühbirne, was es von Lehrmittelfirmen vorgefertigt für die Magnettafel und für Schülerexperimente gibt.

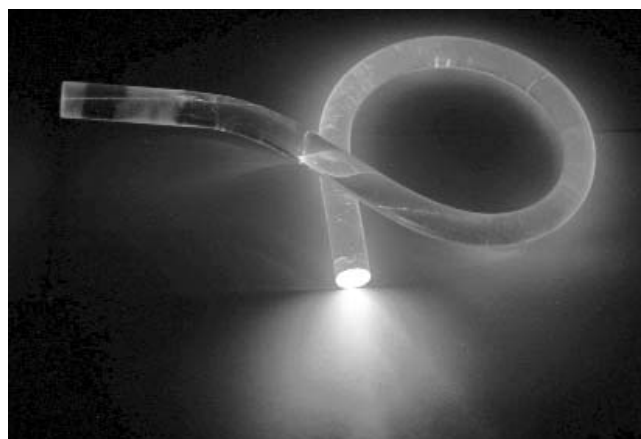


Abb. 12: Ein in einen Plexiglasstab eintretender Laserstrahl tritt vor allem am anderen Ende wieder aus

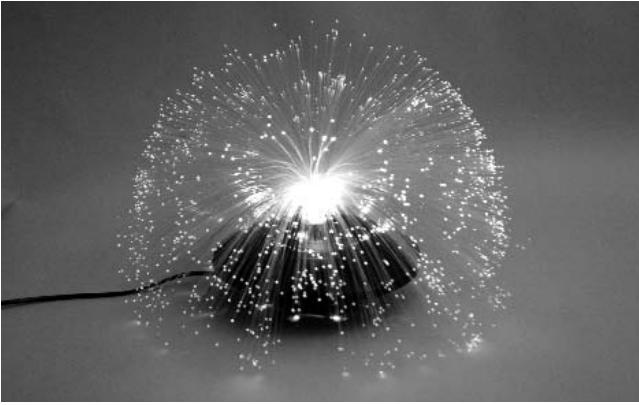


Abb. 13: Eine Glasfaserlampe

3.2 Lichtleitung im Glas

Durch Vielfachreflexion kann sich Licht auf einem Zickzackweg in einer Glasscheibe zweidimensional und einem Glasstab bzw. einer Glasfaser eindimensional ausbreiten. Um den optischen Regensensor zu verstehen, muss zuerst gezeigt werden, wie dies geschieht. Hierzu sollen verschiedene Experimente bzw. Möglichkeiten aufgezeigt werden, um diese Lichtleitung in Glas zu demonstrieren.

Lehrmittelfirmen bieten zu diesem Zweck dicke gebogene Plexiglasstäbe an. Strahlt man in die eine Schnittfläche einen roten Laserstrahl ein, leuchtet die andere Schnittfläche am anderen Ende diffus rot auf sowie auch einige Fehlerstellen im Stab selbst. Leider können in der Regel weder der Laserstrahl im Stab noch die Reflexionspunkte an der Oberfläche gezeigt werden (siehe Abb. 12). Wie das Licht an das andere Ende kommt, bleibt also unklar. Äquivalent zu

diesem Versuch sind die Freihandversuche von Zeier [10, S. 163], bei denen weißes Licht in die Schnittfläche einer Glasplatte oder eines Glasstabes geschickt wird. Allerdings gibt es auch trübe Plexiglasstäbe, bei denen man den Laserlichtstrahl im Glas durch Lichtstreuung sehen kann, was von didaktischem Wert ist. Hier könnte man verschiedene Plexiglasstäbe (z.B. Gardinenstangen [11, S. 11]) ausprobieren und die Eintrittsfläche fein schleifen und polieren.

Nimmt man statt einem Glasstab eine Glasfaser, ist definitiv kein Lichtweg mehr zu sehen, sondern nur das Aufleuchten des anderen Endes. Bei Elektronikhändlern gibt es als Meterware solche Kunststoff-Lichtleiter ohne Ummantelung (mit $\varnothing = 0,5$ mm bei Conrad-Elektronik, Artikel-Nr.: 198412 - 62, 0,52 € pro Meter) und Kunststoff-Lichtleiterkabel mit Ummantelung (mit $\varnothing = 1$ mm bei Conrad-Elektronik, Artikel-Nr.: 183385

- 62, 2,39 € pro Meter). Bekannt und billig sind auch die Glasfaserlampen (siehe Abb. 13), bei denen die Faserenden bunt aufleuchten. Lässt sich das Faserbündel entnehmen, kann man damit leicht experimentieren und auf andere technische Anwendungen eingehen [12].

Bei einem bekannten Freihandexperiment wird der Plexiglasstab durch einen Wasserstrahl ersetzt [12, S. 816]. Dazu werden in einen großen Plastikbecher direkt über dem Boden genau gegenüber zwei Löcher mit einem heißen Nagel gemacht, von denen eines wieder mit Tesafilm gut verschlossen wird. Durch das offene Loch fließt Wasser in einem Strahl heraus. Hält man an das verschlossene Loch einen roten Laserstrahl, erscheint am Auftreffpunkt des Wasserstrahls ein roter Fleck (siehe Abb. 14). Allerdings leuchtet leider auch hier der Wasserstrahl selbst etwas rot und der Lichtstrahl ist im Wasserstrahl wieder nicht verfolgbar.

Ein auf den ersten Blick äquivalenten Versuch erhält man, wenn man ein großes U-Rohr (oder einen transparenten Wassererschlauch) mit Wasser füllt und wieder auf das eine Ende einen Laserstrahl richtet [12, S. 813]. Wie beim Plexiglasstab leuchtet das andere Ende diffus auf. Interessant wird diese Variante, wenn man Wasser mit extrem wenig Milch (ein Tropfen Milch in viel Wasser verdünnen) verwendet, da dann der Strahlengang im U-Rohr durch Streuung sichtbar wird: Man sieht zumindest am Anfang einige Reflexionen des Lichtstrahls an der Grenzfläche Glas – Luft und wie er im Zickzack ein Stück durch das U-Rohr geht. Noch einfacher und schöner ist es, eine durchsichtige zylindrische Flasche zu verwenden (siehe Abb. 15, 0,5 l PET-Flasche), die man halb mit dem obigen Wasser (mit Milchspuren) füllt, horizontal auf den Tisch legt und seitlich flach in das Wasser mit einem Laserlichtstrahl hineinleuchtet [10, S. 11; 9, S. 821].

Möchte man kein Wasser, sondern nur Glas verwenden, um näher an der Windschutzscheibe zu sein, eignet sich sehr gut der folgende faszinierende Versuch [10, S. 11]: Man lässt sich vom Glaser ein Dickspiegelglas (ca. 6 mm dick) in einen Streifen von 4 cm x 25 cm schneiden und lässt die Kanten brechen, damit man sich daran nicht schneidet. Dann fettet man seinen Unterarm mit einer Handcreme leicht ein und reibt die Glasplatte mehrfach darüber, so dass sie einen sehr dünnen lichtstreuenden Film erhält. Strahlt man wieder einen La-

Abb. 15: Laserstrahl in halb voller Wasserflasche (von links unten kommend) wird mehrfach totalreflektiert

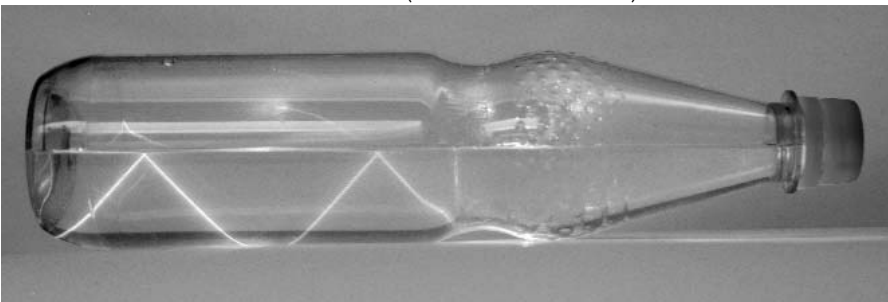
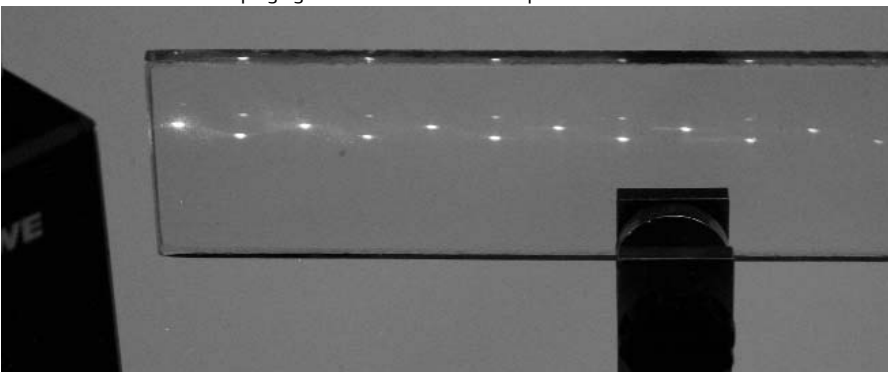


Abb. 16: Laserstrahl in Dickspiegelglas mit Fettfilm: Reflexionspunkte abwechselnd hinten und vorne



serstrahl an der schmalen Seite schräg ein, wird dieser mehrfach totalreflektiert und läuft im Zickzack durch die Glasscheibe. An dem dünnen Fettfilm auf dem Glas wird nun die Totalreflexion – wie oben bereits erwähnt (siehe 3.1) – etwas vermindert und ein kleiner Teil des Lichts nach allen Seiten gestreut. Ein Beobachter sieht auf der Glasplatte abwechselnd vorne und hinten Leuchtpunkte, nämlich die Reflexionspunkte (siehe Abb. 16). Im völlig abgedunkelten Klassenzimmer kann dies jeder Schüler sogar von seinem Platz aus sehen.

Schließlich kann man sich auch selbst eine streuende „Glas“-platte aus Gelatine herstellen, was mit Abstand die schönste, aber evtl. auch „schmutzigste“ Variante ist. Dazu löst man die Gelatine in knapp der Hälfte der auf der Packung angegebenen Wassermenge (z. B. 220 ml in 9 g = 6 Blatt Gelatine) (Wasser unbedingt heiß, aber nicht mehr kochend) unter viel Rühren gut auf und füllt sie ca. 1,0 bis 1,5 cm hoch in ein Gefäß und lässt sie abkühlen, bis sie richtig fest ist. Dabei ist ein durchsichtiges Gefäß (Glas oder Kunststoff) zu empfehlen, so dass man den Gelatineblock mit dem Gefäß verwenden kann (Die Gelatine aus dem Gefäß zu entnehmen ist möglich, aber schwierig: Dazu erwärmt man das Gefäß ganz kurz in heißem Wasser, so dass man den Gelatineblock herausstürzen kann; dabei ist darauf zu achten, dass die Gelatine nicht reißt und die Oberfläche nicht beschädigt wird.). Der Gelatineblock ist durchsichtig, streut aber einen Laserstrahl, so dass dessen Weg sehr schön sichtbar wird. Legt man ihn flach auf ein erhöhtes Podest und leuchtet seitlich mit einem Laserlichtstrahl in die Gelatine hinein, sieht man auch ohne abzudunkeln viele Reflexionen des Lichtstrahls an der Grenzfläche Gelatine – Luft und wie er im Zickzack ein Stück durch die Gelatineplatte geht (siehe Abb. 17). Hat man kein passendes rechteckiges Gefäß, kann man auch ein Reagenzglas mit Gelatine füllen (siehe Abb. 18). Egal, welches Experiment man als Veranschaulichung nutzt, sollte man sich den Strahlenverlauf vorher überlegen, wozu ein Arbeitsblatt wie Abb. 19 möglich ist. Danach sind für die Schüler auch die Reflexionspunkte auf der Glasplatte (Abb. 16) Evidenzen für den tatsächlichen Zickzackverlauf.

3.3 Aufhebung der Totalreflexion

Das Wissen und Verstehen der Lichtleitung in Medien ist für das Erkennen der Arbeitsweise eines Regensensors von entschei-

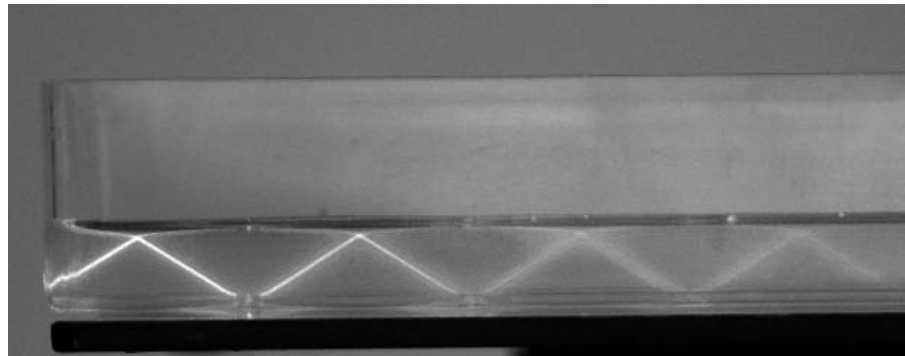


Abb. 17: Laserstrahl im Gelatineblock: Laserstrahl wird vielfach totalreflektiert

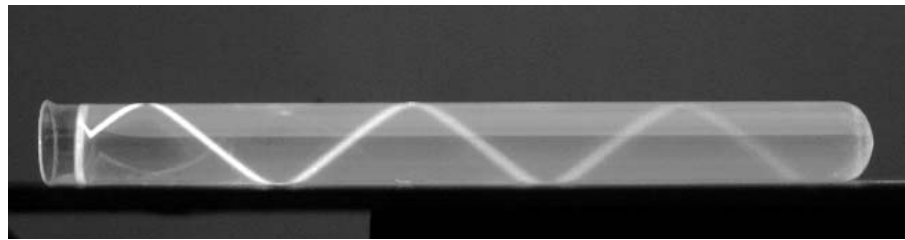


Abb. 18: Laserstrahl in mit Gelatine gefülltem Reagenzglas: Laserstrahl wird vielfach totalreflektiert

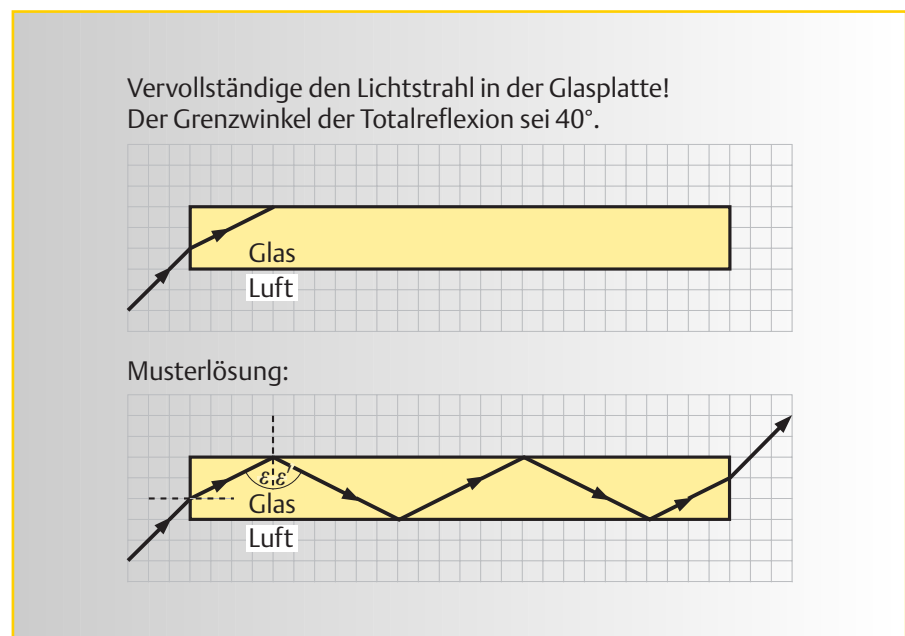
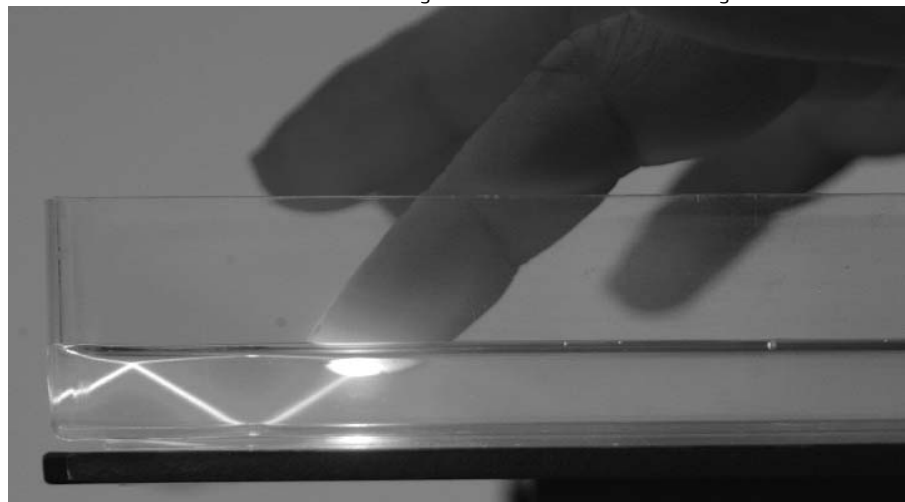


Abb. 19: Arbeitsblatt zur Lichtleitung in Glas

Abb. 20: Laserstrahl im Gelatineblock: Aufhebung der Totalreflexion durch einen Finger



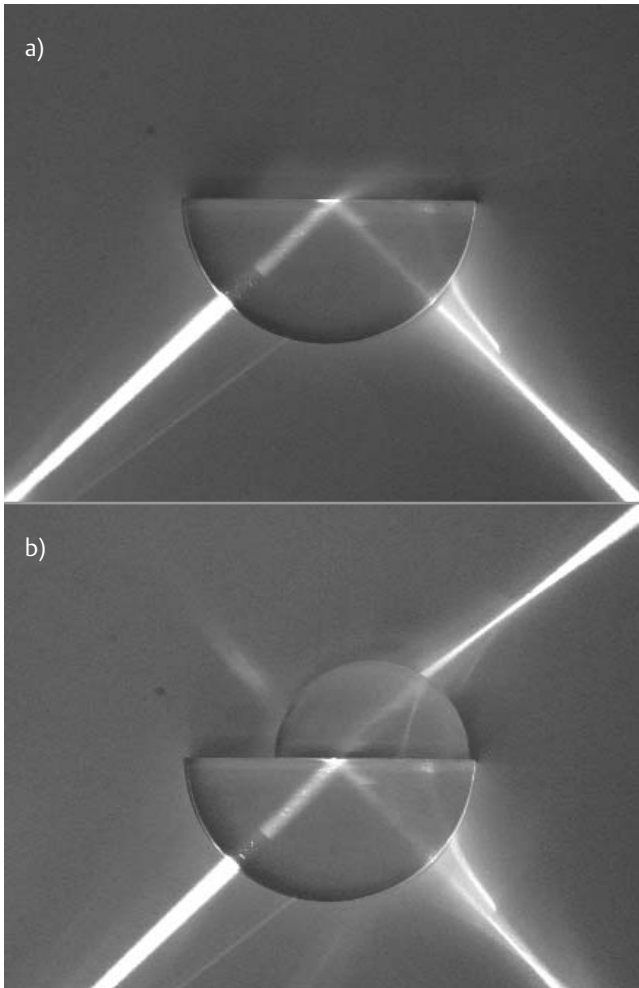


Abb. 21: Aufhebung der Totalreflexion am großen Glashalbzylinder durch ein Wassertropfenmodell (= kleiner Glashalbzylinder)



Abb. 22: Modell mit Glasplatte und Sensor (LDR)

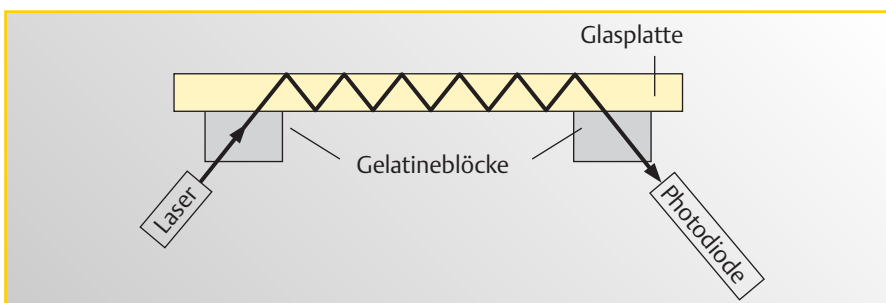


Abb. 23: Skizze des realistischen Regensensormodells

dender Bedeutung. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist auch das Wissen darüber, dass die Bedingung der Totalreflexion sehr einfach von außen beeinflusst werden kann. Die Schüler sollen verstehen, warum ein kleiner Wassertropfen auf der Oberfläche

dafür sorgt, dass das Licht das Glas verlassen kann. Dazu gibt es verschiedene einfache Experimente, die nur die Aufhebung der Totalreflexion zeigen, aber auch solche Experimente, bei denen Teilaspekte des Regensensors modelliert werden.

3.3.1 Kleine qualitative Experimente

Berührt man den Reflexionspunkt auf einer Glas- oder Gelatineplatte, in die, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, Licht eingestrahlt wird, wird dort die Totalreflexion aufgehoben und der Lichtstrahl endet am Finger (siehe Abb. 20). Man kann beobachten, dass die Fingerkuppe zu leuchten anfängt. Eine weitere Möglichkeit ist, auf der oben erwähnten dicken Glasplatte einen Fleck mit schwarzem Lack oder mit einem Filzschreiber zu machen. Trifft der Laserlichtstrahl genau auf diesen Punkt, wird die Totalreflexion aufgehoben und alle nachfolgenden Reflexionspunkte verschwinden. Der Lack hat nämlich eine ähnliche Brechzahl wie Glas, so dass das Licht in ihn eindringt und darin absorbiert wird [10, S. 11]. Hier ist es sinnvoll, darauf hinzuweisen, dass beim realen Regensensor nicht sichtbares, sondern Infrarotlicht verwendet wird. Die zum Verdunkeln der Frontscheibe über dem Regensensor verwendete Farbe ist im sichtbaren Licht undurchsichtig, also schwarz, aber für das verwendete Infrarotlicht ist sie durchsichtig und beeinflusst die Totalreflexion nicht.

3.3.2 Standardversuch mit einem Wassertropfen

Auf der optischen Tafel wird ein Glashalbzylinder mit der flachen Seite nach oben angebracht. Eine Lampe mit streifendem Lichteinfall wird so angebracht, dass der Lichtstrahl unter dem Grenzwinkel der Totalreflexion auf die flache Seite auftrifft. Nun sehen die Schüler den einfallenden und den totalreflektierten Strahl (siehe Abb. 21a). Tropft man Wasser an der Stelle auf das Glas, an der der Lichtstrahl totalreflektiert wird, erscheint wegen der Aufhebung der Totalreflexionsbedingung der gebrochene Lichtstrahl, welcher das Glas nach oben verlässt. Der reflektierte Lichtstrahl ist weiterhin, aber etwas lichtschwächer zu beobachten, da bei der Brechung immer ein Teil des Lichtstrahls reflektiert wird. Anstatt des Wassertropfens kann man auch einen zweiten, idealerweise kleineren Glashalbzylinder verwenden (siehe Abb. 21b). Zum besseren Kontakt befeuchtet man die Kontaktfläche mit etwas Wasser.

Dieser Versuch kann auch quantitativ untersucht werden. Als Lichtsensor kann man eine Solarzelle [13, S. 172] oder eine Photodiode verwenden und deren Spannung messen. Alternativ kann man auch einen lichtabhängigen Widerstand LDR verwenden und dessen Widerstand messen.

Dadurch wird dieser Versuch zu einer schönen Modellierung eines Regensensors, da man wie beim realen Regensensor ein Steuersignal erhält, welches weiterverarbeitet werden kann.

3.3.3 Modell mit größerer Glasplatte

Abb. 22 zeigt einen einfachen Aufbau mit der Glasplatte aus Abschnitt 3.2 (Abb. 16). Hier wird die Totalreflexion an den Reflexionspunkten deutlich und es ist gleichzeitig eine Intensitätsmessung des durchgehenden Lichtstrahles möglich. Statt einen großen Wassertropfen auf das Glas zu setzen, besprüht man die Glasplatte von oben mit feinen Wassertöpfchen aus einem Wassersprüher, wie er für Pflanzen oder für Bügelwäsche verwendet wird (siehe Abb. 22). Das Messsignal ändert sich nun mit der Menge aufgesprühten Wassers. So verringert sich z.B. der Widerstand eines LDR von ca. 30 M Ω bei durchgehendem Lichtstrahl auf ca. 20 k Ω , wenn viel Wasser aufgesprüht ist.

Mit einer Gelatineplatte kann man prinzipiell die gleichen Versuche wie mit dem Glashalbzylinder oder der Glasplatte durchführen, aber man sieht gut den gesamten Lichtstrahl mit dem Zickzackverlauf in der Gelatineplatte. Hier verwendet man anstatt der Lampe besser einen Laser, da Laserlicht gut im Gelatineblock sichtbar ist. Diese Variante ist dem realen Regensensor etwas ähnlicher, da im quaderförmigen Gelatineblock mehrere Totalreflexionen beobachtet werden können und somit an mehreren Punkten die Totalreflexion aufgehoben werden kann. Es ist völlig problemlos, mit einem kleinen Glashalbzylinder die Aufhebung der Totalreflexionsbedingung zu demonstrieren. Bei der Verwendung von Wasser ist zu beachten, dass der Gelatineblock an den Stellen, an denen das Wasser aufliegt, etwas aufquellen kann und eintrübt. Daher ist er nicht beliebig oft und lange einsetzbar.

3.3.4 Modell mit Ein- und Auskopplung

Mit Gelatineblöcken und einer dicken Glasplatte kann man auch schön den Ein- und Auskopplungsvorgang des Lichts beim Regensensor und dessen Funktionsweise zeigen. Die Gelatineblöcke sind das Modell für die Silikonkissen, die Glasplatte für die Frontscheibe. Die dicke Glasplatte wird so auf zwei nasse Gelatineblöcke gestellt, dass man auf der einen Seite über den Gelatineblock einen Laserstrahl in die Glasplatte ein koppeln kann (siehe Abb. 23 und 24). Da-

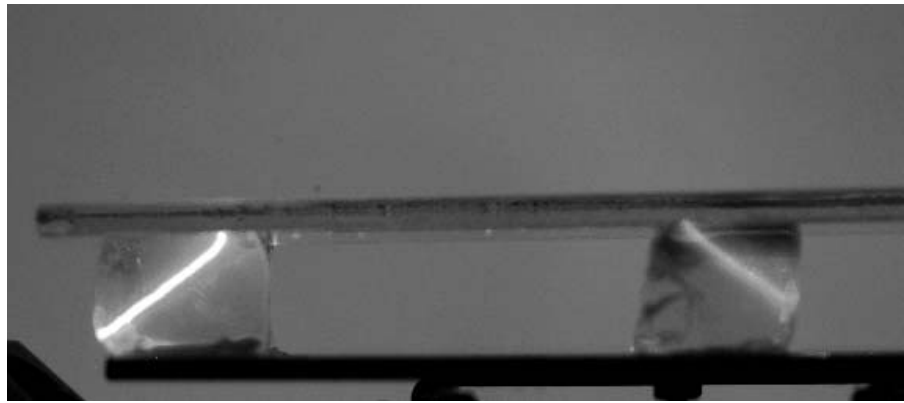


Abb. 24: Foto des realistischen Regensensormodells entsprechend Abb. 23

bei ist darauf zu achten, dass der Lichtstrahl nicht wieder in den Gelatineblock zurückkehren kann. Auf der Vorder- und Rückseite der Glasplatte sind wegen des Medienwechsels von Glas nach Luft mehrere Totalreflexionen vorhanden, die man wie in Abb. 16 und 22 an den Leuchtpunkten auf dem dünnen Fettfilm sieht. Trifft der Laserstrahl auf den anderen Gelatineblock, so ist die Bedingung für die Totalreflexion nicht mehr gegeben und der Laserstrahl verlässt analog zum realen Regensensor die Glasscheibe und ist ausgekoppelt (siehe Abb. 24).

Verwendet man zur Messung der Intensität des ausgekoppelten Lichtstrahls eine Photodiode, um ein elektrisches Signal zu erhalten, hat man ein einfaches, aber auch vom Aufbau her ein sehr realistisches Modell eines Regensensors. Besprüht man die Glasplatte wieder von oben mit Wasser, so ist eine Änderung des Messsignals erkennbar.

4 | Fazit

● Man sieht, dass die Grundidee des Regensensors in der Schule leicht vermittelbar ist. Lichtleitung im Glas durch Totalreflexion ist allgemein sehr interessant und faszinierend, wozu einige Versuche aufgezeigt wurden. Der Einsatz von Gelatine ist dabei eine attraktive neue Möglichkeit. Modelle zum Regensensor können auf unterschiedlichem Niveau bzw. unterschiedlich nah an der Realität gebaut werden. Im Schulunterricht, aber auch im Universitätspraktikum zu Schulversuchen fand der Regensensor bzw. ein Modell des solchen sehr großes Interesse. Den Lehramtsstudenten gefiel dabei nicht nur der Anwendungsbezug, sondern insbesondere, dass der Lichtweg in der Gelatine bzw. an den Reflexionspunkten der Glasplatte sichtbar gemacht werden kann.

Literatur

- [1] Cordes, H.: Der Regensensor als zentraler Lerngegenstand in der Klasse 8: Eine Unterrichtssequenz zur Erarbeitung der Grundlagen der Strahlenoptik, <http://www.wcs.uni-paderborn.de/schulen/sem/downloads/cordessensor.pdf>
- [2] Bammel, K.: Klare Sicht bei Sauwetter – in: Physik Journal, März 2007, S. 64–65
- [3] Hänsel, H.; Neumann W.: Physik (Elektrizität, Optik, Raum und Zeit), Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 1993, S. 306–309
- [4] Südbeck, W.: Die seitliche Strahlversetzung bei der Totalreflexion – in: Praxis der Naturwissenschaften – Physik 43, 1994, Nr. 2, S. 14–15
- [5] Löw, A.: Luftspiegelungen auf Landstraßen – in: Praxis der Naturwissenschaften – Physik 42, 1993, Nr. 5, S. 42–43
- [6] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Physik für Ingenieure, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989
- [7] Naumann, H.; Schröder, G.: Bauelemente der Optik, 5. Auflage, C. Hanser-Verlag, München, 1987, S. 529–549
- [8] Schröder, G.: Technische Optik, 7. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1990, S. 97–104
- [9] Koppelman, G.; Rehnert, H.: Experimente mit Lichtleitfasern und technische Anwendungen – in: Praxis der Naturwissenschaften – Physik 38, 1989, Nr. 2, S. 15–22
- [10] Zeier, E.: Physikalische Freihandversuche Kleine Experimente, 3. unveränderte Auflage, Aulis Verlag Deubner & Co KG, Köln, 1994
- [11] Koppelman, G.; Reinhert, H.: Demonstrationsversuche zur Totalreflexion und zur Lichtleitung in optischen Fasern – in: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 38, 1989, Nr. 2, S. 9–14
- [12] Hilscher, H. (Koordination): Physikalische Freihandexperimente, Aulis Verlag Deubner, Köln, 2004
- [13] Eckert, B.; Stetzenbach, W.; Jodl, H.-J.: Low Cost – High Tech Freihandversuche Physik, Aulis Verlag Deubner, Köln, 2000

Anschriften der Verfasser

StR Thomas Geßner, Hanns-Seidel-Gymnasium, An der Maas 2, 63768 Hörsbach, E-Mail: gessner@physik.uni-wuerzburg.de

AR Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg,

E-Mail: wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de