

Helmut Dittmann / Werner B. Schneider

## Mit dem Computer ins Aquarium geschaut<sup>1</sup>

Es wird ein Simulationsprogramm zur Lichtbrechung beschrieben und insbesondere die Abbildung durch eine ebene Grenzfläche untersucht. Die Simulationsergebnisse zeigen, daß die Abbildungseigenschaften der ebenen Grenzfläche vom Beobachtungswinkel und vom Abstand des Beobachters und des Objektes von der Grenzfläche abhängen. Die Ergebnisse werden durch entsprechende Beobachtungen an einem Aquarium bestätigt. Ein Vorteil der Simulation besteht darin, daß man ohne den sonst erforderlichen mathematischen Aufwand direkt zu den interessanten Ergebnissen rund um die Abbildungen durch Grenzflächen kommt. Zusätzlich wird ein einfaches Freihandexperiment auf dem Tageslichtprojektor zur Brechzahlbestimmung beschrieben.

### 1. Einleitung

Wörtlich ist die Überschrift natürlich nicht zu nehmen. Vielmehr haben wir uns durch ein geeignetes Simulationsprogramm zu einer Entdeckungsreise rund um ein mit Wasser gefülltes Aquarium anregen lassen und dabei bemerkt, daß ein so wohlbekanntes Phänomen wie die Lichtbrechung beim genauen Hinsehen doch noch Überraschungen bereithält. Die Simulation ermöglicht eine schnelle, fast spielerische Untersuchung der Abbildung durch eine ebene Grenzfläche ([1], [2], [3]) – ohne jeden mathematischen Aufwand. Wichtig ist dabei, daß die Lage des Beobachtungsstandortes und des beobachteten Objektes beliebig variiert werden können, wobei auch Situationen der Untersuchung zugänglich werden, die sich normalerweise aufgrund anatomischer Gegebenheiten (die Länge unserer Nase begrenzt z.B. den Abstand unseres Auges von der Grenzfläche nach unten) nur mit Mühe realisieren lassen. Es sind aber gerade diese Situationen, die zu überraschenden Beobachtungen führen und die auch zeigen, daß die Behandlung der Brechung in unseren gängigen Physikbüchern z. Teil nicht richtig bzw. nur unvollständig ist. Im folgenden werden hierzu Ergebnisse vorgestellt, wie sie die Simulation liefert, und es wird beschrieben, wie man die Simulationsergebnisse durch Realbeobachtungen nachprüfen kann.

### 2. Erläuterungen zum Simulationsprogramm

Das von uns entwickelte Programm zur Abbildung durch eine ebene Grenzfläche liegt in drei Varianten vor, die sich nur durch die jeweils vorgegebene Anfangssituation unterscheiden. Allen ist gemeinsam, daß der Bildschirm einen ebenen Schnitt senkrecht zur Grenzfläche darstellt. Auf dem Bildschirm erscheint somit die Grenzfläche als Gerade. Objekt- oder Beobachtungspunkt sind auf dem Schirm frei wählbar, ebenso die Brechzahlen der beiden Medien.

Bei der *Variante (A)* kann man beliebige, vom Objektpunkt P ausgehende, in der Bildschirmenebene verlaufende Strahlen „starten“ und verfolgen, wie sie an der Grenze „geknickt“ wer-

<sup>1</sup> Vorgetragen auf der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 1989 in Bonn. Verhandl. DPG (VI) 24, Didaktik (1989)

den. Auch die rückwärtigen Strahlverlängerungen werden geliefert. Wie üblich erhält man den Bildpunkt P aus dem Schnittpunkt von jeweils zwei rückwärtigen Strahlverlängerungen. Man kann damit untersuchen, ob ein Bildpunkt existiert, ob er eindeutig ist und ob seine Lage eventuell auch von der Öffnung oder der Richtung des abbildenden Bündels (Blickrichtung des Auges) abhängt.

Die *Variante (B)* baut auf der ersten auf: Der Originalpunkt P wird fest eingegeben, der Standort des Beobachters B (Auge) jenseits der Grenzfläche kann mit der Maus beliebig positioniert werden. Das Programm sucht dann nach dem Fermatschen Prinzip den Lichtweg, der von P zum Beobachter B führt – falls es einen solchen gibt – und nimmt an, daß von P ein Lichtbündel mit  $1^\circ$  Öffnungswinkel startet, dessen zentraler Strahl den vorher errechneten Lichtweg enthält. Mit diesem Lichtwinkel wird der Ort des Bildpunktes P' wie bei der Variante (A) errechnet und auf dem Bildschirm ausgegeben. Die Darstellung der abbildenden Bündel wird hier unterdrückt, um eine Überfrachtung des Bildschirms mit Linien zu vermeiden. Mit dieser Variante kann man untersuchen, ob der Ort eines Bildpunktes P' vom Standort des Beobachters abhängt.

Bei der *Variante (C)* ist der Standort des Auges fest gewählt und man positioniert mit der Maus jenseits der Grenzfläche Objektpunkte P, die dann wie in der Variante (B) abgebildet werden. Auf diese Weise läßt sich mühelos untersuchen, wie ein ausgedehntes, einfaches Objekt (z.B. eine Gerade oder ein Quadrat) von einem festen Standort aus gesehen wird.

Das Simulationsprogramm ist in GFA-Basic für den Atari ST geschrieben. Es werden neben dem Brechungsgesetz nur elementare Beziehungen aus der analytischen Geometrie der Ebene verwendet. (Interessenten schicken wir das „Listing“ oder bei Voreinsendung einer 3,5"-Diskette das Programm zu.)

### 3. Einige charakteristische Ergebnisse der Simulation

#### 3.1. Programmvariante A

*Zur Abbildung 1:* Hier ist ein fester Objektpunkt P vorausgesetzt, von dem aus Strahlenbündel mit den Öffnungswinkeln  $12^\circ$ ,  $24^\circ$  und  $60^\circ$  gestartet werden. Die Achsen der Strahlenbündel stehen jeweils senkrecht auf der Grenzfläche; auf ihr liegt das beobachtende Auge, das allerdings riesengroß sein müßte, um Bündel mit solchen Öffnungswinkeln zu erfassen. Neben der bekannten „optischen Hebung“ beobachtet man, daß es nur für Bündel mit kleinem Öffnungswinkel (kleiner als ca.  $10^\circ$ ) einen annähernd eindeutigen Bildpunkt gibt. Mit zunehmendem Öffnungswinkel fallen die zugehörigen Bildpunkte immer weiter auseinander. Das menschliche Auge erfäßt glücklicherweise – auch bei Akkommodation auf nächste Nähe – kaum Öffnungswinkel mit mehr als  $1^\circ$ . Wenn wir also den Fisch im Aquarium scharf sehen, so liegt das vor allem an anatomischen Gegebenheiten. Normale Fotoobjektive erfassen zwar etwas größere Öffnungswinkel (Beispiel: für  $f = 28$  mm, Blende 2,8 und  $s = 30$  cm erhält man ca.  $2^\circ$ ), was noch nicht zu einer Unschärfe führt. Anders ist es bei Mikroskopobjektiven. Hier wird der Einfluß des Deckglases auf die Abbildung durch entsprechende Objektivkorrekturen ausgeglichen, die bei Immersionsobjektiven anders sein muß, als bei Trockenobjektiven [3].

*Zur Abbildung 2:* Aus der scheinbaren Anhebung  $\Delta h$  (optische Hebung) eines Objektpunktes kann man in einem einfachen Freihandversuch die Brechzahl  $n$  bestimmen.

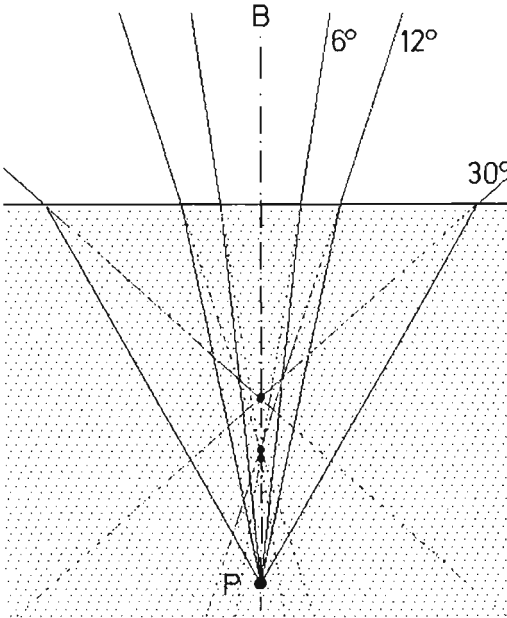


Abb. 1

Abb. 1 Simulationsergebnis: Objektpunkt P und Beobachter B liegen auf einer Senkrechten zur Begrenzungsfläche (das optisch dichtere Medium mit  $n = 1,5$  ist punktiert gezeichnet).

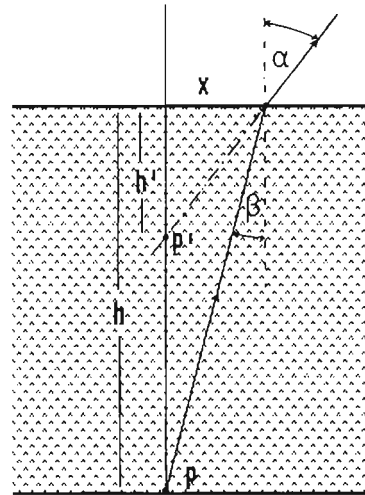


Abb. 2

Abb. 2 Illustration zur Bestimmung der Brechzahl  $n$  eines Mediums auf einem Tageslichtprojektor unter Anwendung der optischen Hebung.

Unter der Voraussetzung eines kleinen Öffnungswinkels und senkrechter Beobachtungsrichtung gilt die einfache Beziehung:

$$n = \frac{h}{(h - \Delta h)} \quad (1)$$

denn aus Abbildung 2 folgt für kleine Winkel:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \approx \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} = \frac{h}{(h - \Delta h)}$$

In dem Freihandversuch zur Bestimmung von  $n$ , der auf dem Tageslichtprojektor ausgeführt werden kann, wird die Eintauchtiefe  $h$  so groß gewählt, daß die Hebung  $\Delta h$  nach Gleichung (1) im cm-Bereich liegt. Im Versuch wird zunächst eine Folie scharf abgebildet. Auf die Folie stellt man eine mit Wasser ca.  $h = 10$  cm hoch gefüllte Küvette oder eine Plexiglasplatte ( $h = 6$  cm, evtl. Stapel aus drei Einzelplatten). In dem von der Küvette (Platte) überdeckten Bereich erscheint jetzt die Abbildung der Folie unscharf: diesen Teil „sieht“ das Objektiv des Projektors um  $\Delta h$  angehoben. Man muß das Objektiv daher „hochdrehen“, um den überdeckten Bereich scharf zu stellen; der übrige Teil der Folie wird dabei unscharf. Über diese „Hebung“ des Objektivs läßt sich  $\Delta h$  leicht bestimmen und man erhält mit Glg. (1) die gesuchte Brechzahl.

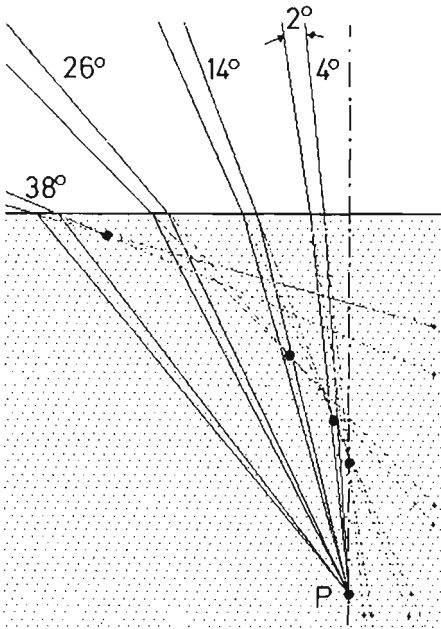


Abb. 3 Simulationsergebnis: kleiner Öffnungswinkel und unterschiedliche Beobachtungsrichtungen ( $n = 1,5$ ).

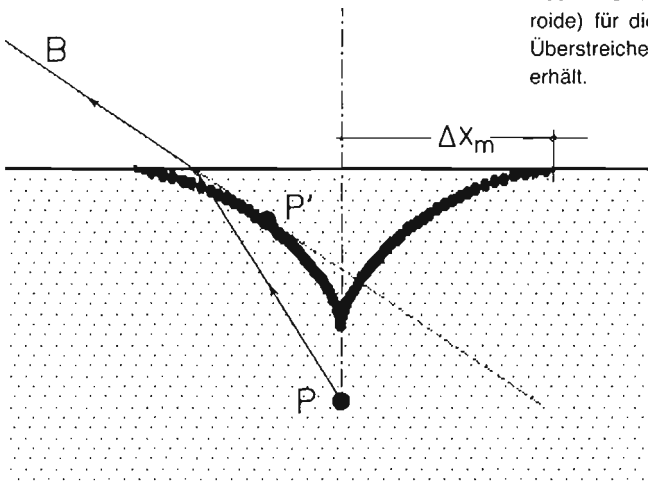


Abb. 4 Simulationsergebnis: Hüllkurve (Asteroide) für die Bildpunkte, wie man sie beim Überstreichen aller Beobachtungsrichtungen erhält.

### 3.2. Programmvariante B

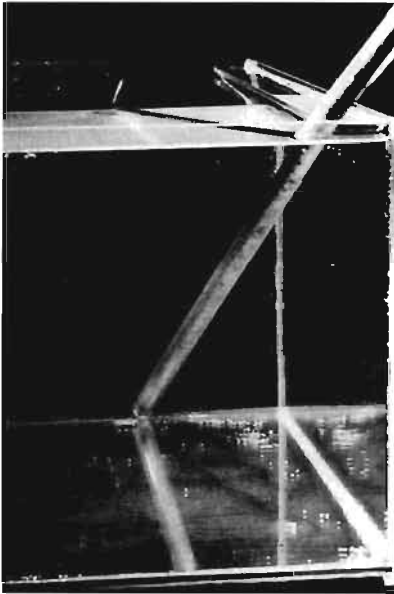
Zur *Abbildung 3*: Hier werden mehrere Bündel mit kleinen Öffnungswinkeln – jetzt schräg zur Grenzfläche – gestartet. Man bemerkt, daß mit wachsender Neigung des Beobachtungsbündels die optische Hebung größer wird und daß der Bildpunkt zum Beobachter hin verschoben wird.

Zur *Abbildung 4*: Diese Darstellung zeigt alle möglichen Bilder des Objektpunktes  $P$ , die entstehen, wenn der Beobachter seinen Standort so verändert, daß die Brechungswinkel des

austretenden Bündels zwischen  $-90^\circ$  und  $+90^\circ$  variieren (senkrechte bis streifende Blickrichtung nach beiden Seiten). Es handelt sich um eine Asteroide, die man sonst nur durch eine für die Schule zu komplizierte Herleitung (z.B. in [1]) als Hüllkurve erhalten kann. Bemerkenswert ist, daß die Anhebung bei streifender Blickrichtung bis in die Grenzfläche erfolgt, was in Lehrbüchern oft verschwiegen wird. Für die maximale seitliche Verschiebung  $\Delta x_m$ , die bei streifender Blickrichtung erreicht wird, gilt nach [1]:

$$\Delta x_m = \frac{h}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (2)$$

Zur *Abbildung 5*: Die Anhebung bis zur Grenzfläche mit gleichzeitiger seitlicher Verschiebung läßt sich mit der in *Abb. 5* dargestellten Anordnung gut sichtbar machen: Man beobachtet bei einem nicht ganz randvoll gefüllten Aquarium die Wasseroberfläche streifend durch eine Seitenfläche hindurch. Vorteilhaft ist die Beobachtung in einem abgedunkelten Raum bei seitlicher, nicht blendender Beleuchtung. Dann wird das Auge nicht durch markantere Objekte oder Reflexe abgelenkt, was das Fixieren auf die jeweils interessierende Stelle erleichtert. Stellt man zusätzlich das Aquarium auf eine helle Unterlage, so daß sich der Boden gut von den übrigen Teilen abhebt, so kann die scheinbare Hebung des Bodens



*Abb. 5* Fotografischer Nachweis für die Anhebung von Objektpunkten im dichteren Medium bis in die Grenzfläche bei streifender Beobachtung. Der hintere helle Begrenzungsstreifen in der Oberfläche entspricht der Hinterkante des „angehobenen“, helleren Bodens, der sich anschließende schwarze Streifen entspricht der Verschiebung der angehobenen, hinteren Bodenkante um  $\Delta x_m$  bezogen auf die Rückwand des Aquariums. Die Aufnahme wurde unter folgenden Bedingungen bei einem mit Wasser gefüllten Aquarium gemacht: Abmessungen des Aquariums:  $600 \times 300 \times 300 \text{ mm}^3$  der Stab reichte bis zur hinteren Bodenkante, neben dem Stabende liegt noch eine Münze auf dem Boden; zur Verminderung der Reflexe wurden die Aufnahme in einem verdunkelten Raum bei Dunkelfeldbeleuchtung des Aquariums gemacht; Kleinbildkamera: Objektiv  $f = 28 \text{ mm}$ , Blende 16, Entfernungseinstellung auf ca. 30 cm.

bis in die Oberfläche besonders gut beobachtet werden und man kann  $\Delta x_m$  direkt bestimmen. Hierzu markiert man jene Stelle der Seitenwand, an der die heller erscheinende Bodenkante in der Oberfläche scharf abgebildet wird.  $\Delta x_m$  ergibt sich aus dem Abstand dieser Stelle von der Aquarierrückwand. Bei einer Wassertiefe von z.B. 24 cm erwartet man nach obiger Gleichung  $\Delta x = 27,2$  cm. Wir konnten diese Verschiebung nach der beschriebenen Methode bis auf 0,5 cm bestätigen.

Zur *Abbildung 6*: Mit der Anordnung in *Abbildung 5* läßt sich ein anderer Aspekt der Abbildung durch ebene Grenzflächen demonstrieren, der bisher hier übergangen wurde: der Astigmatismus (z.B. [3], [4]). *Abbildung 6* zeigt das Zustandekommen dieses Abbildungsfehlers. Unser Simulationsprogramm berücksichtigt nur solche Strahlen, die in einer zur Grenzfläche senkrechten Ebene durch P liegen, das entspricht der Meridionalebene, welche die große Achse  $M_1M_2$  enthält. Strahlen, die der Sagittalebene durch  $S_1S_2$  und P angehören, bewirken nur eine Hebung des Objektes P entlang des Lotes ( $\Delta x = 0$ ), bei streifender Blickrichtung bis in die Oberfläche hinein. Bei geeigneter Beleuchtung des Aquariums, wie oben beschrieben, kann man das Auge zu den beiden möglichen Fixierstellungen für das gleiche Objekt (hintere Bodenkante) zwingen.

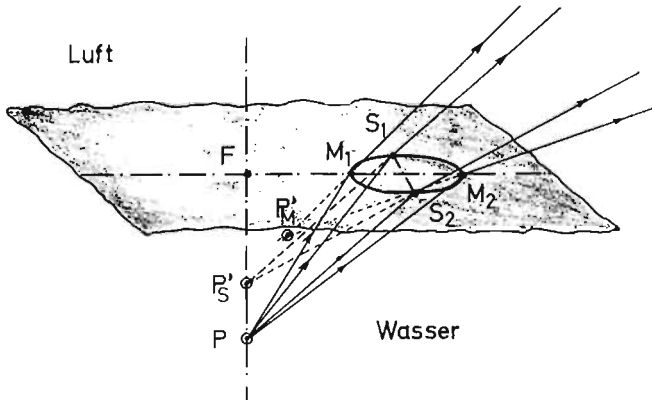


Abb. 6 Skizze zur Entstehung eines Abbildungsfehlers (Astigmatismus) bei der Abbildung durch eine ebene Grenzfläche. Ein von P ausgehender, gegen die Senkrechte geneigter Lichtkegel erzeugt in der Projektion eine ellipsenförmige Grundfläche auf der Grenzfläche mit der großen Halbachse  $M_1M_2$  in der durch den Mittelstrahl PA und dem Lot PF gebildeten Einfallsebene.  $S_1S_2$  bildet die kleine Halbachse. Die in der Einfallsebene verlaufenden Randstrahlen (Meridionalstrahlen) haben unterschiedliche Einfallswinkel so daß sich nach der Brechung die rückwärtigen Verlängerungen der Strahlen nicht mehr auf dem Lot im Punkt  $P'_M$  treffen. Für die Randstrahlen durch die Endpunkte der kleinen Halbachse (Sagittalstrahlen) gilt dies nicht. Hier liegt der Bildpunkt  $P'_S$  aus Symmetriegründen auf dem Lot. Vom Beobachter im optisch dünneren Medium (hier Luft) sieht es daher so aus, als käme das Licht von zwei unterschiedlichen Lichtpunkten her.

### 3.3. Variante (C)

Zur *Abbildung 7*: Hier sind die Ergebnisse der Simulation für eine im dichteren Medium parallel zur Grenzfläche angeordnete Objektpunktreihe (Stab) für zwei verschiedene Abstände des Beobachters von der Grenzfläche dargestellt. Der Beobachter befindet sich in der Mit-

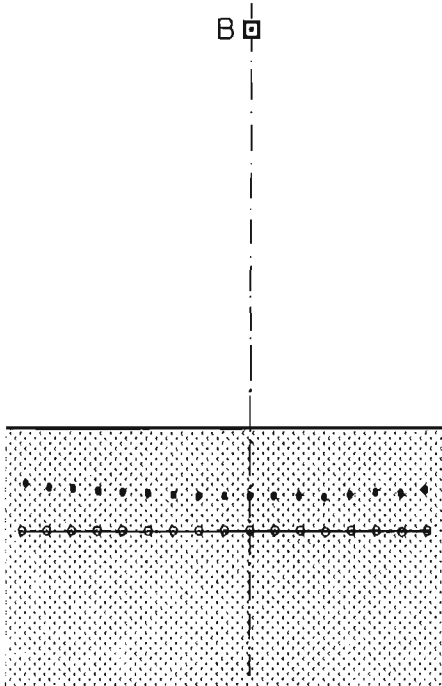


Abb. 7a

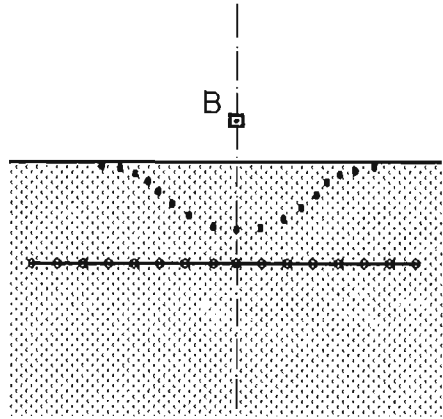


Abb. 7b

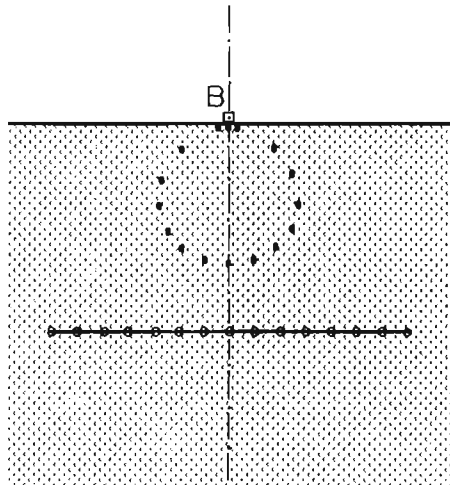


Abb. 7c

Abb. 7 Simulationsergebnis: Abbildung eines parallel zur Grenzfläche angeordneten Stabs; a) für einen Betrachtungsabstand zur Grenzfläche von ca. einer Stablänge, in b) für einen Abstand von ca. 1/8 der Stablänge und in c) für einen auf der Grenzfläche sitzenden Beobachter.

telsenkrechten des Stabes. Ist der Abstand groß, in Abbildung 7a etwa die Länge des Stabes, so stellt man neben der optischen Hebung nur eine leichte Krümmung fest. Wählt man einen noch größeren Abstand, so wird die Krümmung unmerklich. Das Bild ändert sich jedoch dramatisch, wenn man zu kleineren Abständen übergeht, in Abbildung 7b z.B. 1/8 der Stablänge. Aus dem geraden Stab wird jetzt ein helmförmiges Gebilde, bei dem die Randpunkte fast in der Grenzfläche liegen. Dies ist eine direkte Konsequenz aus Abbildung 4.

Die Randpunkte des Stabes sind von B aus nur bei fast streifender Beobachtungsrichtung zu sehen. Dies wird noch extremer, wenn man mit B bis in die Grenzfläche vorrückt. Aus dem geraden Stab wird dann ein annähernd kreisrundes Gebilde (Abb. 7c). So könnte z.B. eine Fliege, die auf einer Glasscheibe sitzt, Linien auf einem dahinter angebrachten Bild sehen. Allgemein läßt sich sagen, daß die Verzerrung des Stabes umso stärker wird, je größer der Winkel ist, unter dem der Beobachter die beiden Stabenden sieht.

Die starken Verzerrungen überraschen: sie entsprechen nicht unserer Alltagserfahrung. Zu selten kommen wir in Situationen, bei denen unser Auge der Grenzfläche sehr nahe kommt (schon die Länge unserer Nase ist hier ein Hindernis) und gleichzeitig ein großer Winkel überblickt werden muß. Am Aquarium können wir aber die Vorhersagen der Simulation bequem beobachten und auch fotografieren. Man muß nur wissen, wie man zu schauen hat. Hier gibt uns der Computer die entsprechende Hilfe. Aus der Simulation wissen wir, daß es nur auf das Verhältnis von Stablänge und Abstand des Beobachters von der Grenzfläche ankommt und daß bei einem Abstand von  $1/8$  der Stablänge bereits eine sehr starke Krümmung auftritt. Um nicht zu un bequem kleinen Beobachtungsabständen gezwungen zu sein, die auch das Akkommodationsvermögen überfordern würden, muß man daher einen ausreichend großen Stab und ein entsprechend großes Aquarium (z.B.  $600 \times 300 \times 300 \text{ mm}^3$ ) verwenden. Die vorhergesagte Krümmung einer parallel zur Grenzfläche angeordneten Geraden läßt sich bequem an einer Bodenkante des Aquariums beobachten. Schräg von oben betrachtet sieht man deutlich die Krümmung; das Foto in Abbildung 8 zeigt als Beispiel für diesen Abbildungsfehler die eine Hälfte des „Helmes“ von Abbildung 7b.



Abb. 8 Fotografie der langen hinteren Bodenkante des Aquariums. Blickrichtung von der linken unteren Ecke schräg nach hinten auf den Boden aus ca. 3 cm Höhe. Aufnahmebedingungen wie in Abb. 5.

*Zur Abbildung 9:* Hier wird das Simulationsergebnis für einen schräg ins Wasser eintauchenden Stab, das Paradebeispiel im Optikunterricht, dargestellt. Dabei werden zwei verschiedene Beobachtungsstandorte relativ zum Stab gewählt. Auch hier tritt ein Effekt auf, der in den meisten Lehrbüchern verschwiegen wird: Der Stab erscheint nicht nur geknickt – wie in den gängigen Physikbüchern dargestellt – sondern zusätzlich gekrümmt. Die Krümmung ist konkav bei einer Blickrichtung schräg entlang des Stabes (Abb. 9a), dagegen kon-



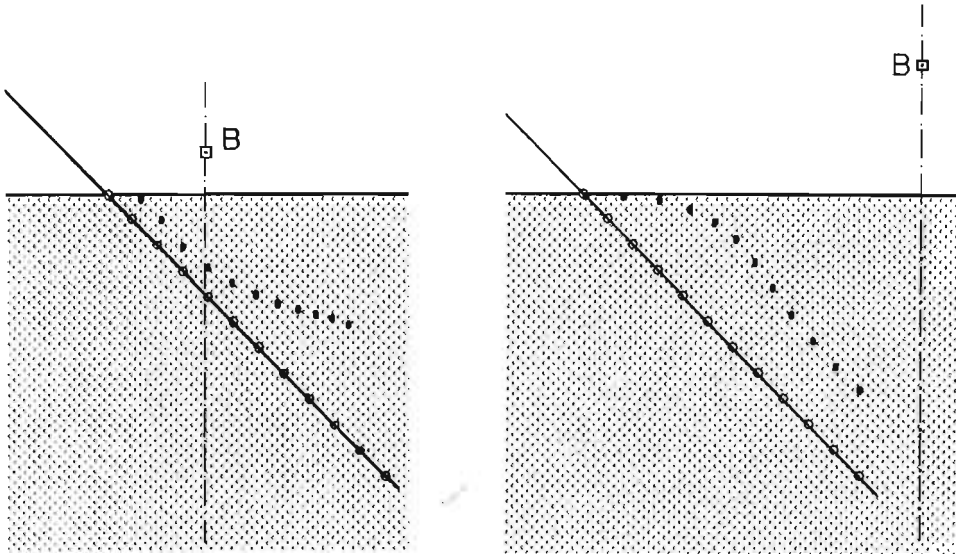


Abb. 9 Simulationsergebnis für den schräg ins Wasser eintauchenden Stab bei unterschiedlichem Betrachtungsabstand und unterschiedlicher Blickrichtung: a) Blick schräg entlang des Stabs und in b) Blickrichtung schräg auf den Stab.

vex bei schrägem Blick auf den Stab (Abb. 9b). Beide Krümmungen sind im Aquarium leicht zu beobachten und zu fotografieren, vorausgesetzt, daß man nahe genug mit dem Auge (Kamera) herangeht. Die entsprechenden Aufnahmen sind in Abb. 10 dargestellt.

Diese unerwarteten und wenig bekannten Ergebnisse sollten anregen, über den Anfangsunterricht zur Lichtbrechung und über die entsprechenden Darstellungen in Lehrbüchern nachzudenken. Es wäre doch z.B. leicht möglich, daß ein Kind am eigenen Aquarium zu Hause entsprechend merkwürdige Beobachtungen gemacht hat. Sollte unser Anfangsunterricht solchen Beobachtungen nicht mehr Raum geben? Werden wir unserem Fach, das ich eine möglichst exakte Naturbeschreibung zum Ziel setzt, gerecht, wenn wir die Dinge so ungenau und oberflächlich betrachten?

#### 4. Zum Einsatz des Programms im Unterricht

Beim Einsatz im elementaren Optikunterricht wird man auf den mathematischen Kern des Programmes verzichten. Umso wichtiger ist es, für „vertrauensbildende Maßnahmen“ zu sorgen. Dazu eignet sich besonders die Variante (A), die man parallel zu Realversuchen mit der optischen Scheibe einsetzen kann. Man zeigt also den Schülern, daß am Bildschirm die Strahlen genauso geknickt werden und den gleichen Gesetzmäßigkeiten gehorchen, wie die echten Lichtstrahlen und daß die mit dem Programm gewonnenen Ergebnisse als wirkliche Physik akzeptiert werden können.

Neben den oben beschriebenen sind auch noch andere Simulationen recht interessant; so z.B. der Fall des Beobachters, der sich im optisch dichteren Medium befindet.

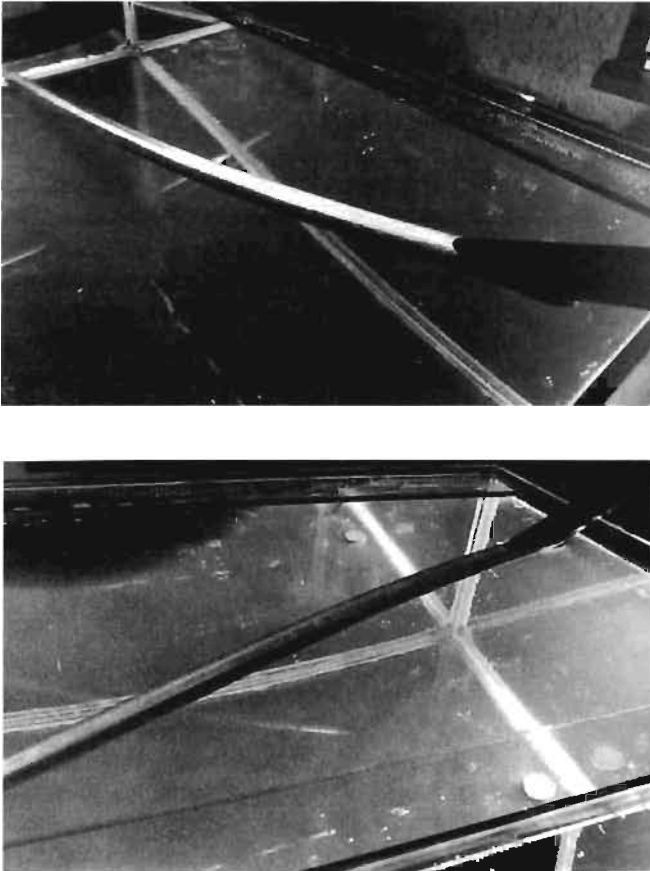


Abb. 10 Fotografie des schräg ins Wasser eintauchenden Stabs für die in Abb. 9 angegebenen Bedingungen: a) Blickrichtung schräg entlang des Stabs und in b) schräg auf den Stab. Aufnahmebedingungen wie in Abb. 5.

Hier läßt sich z.B. die Frage beantworten, wie ein Fisch den am Ufer stehenden Angler sieht. Insgesamt kann mit dem Programm der im Unterricht oft zu kurz kommende Aspekt der Abbildung durch ebene Grenzflächen ohne großen Zeitaufwand behandelt werden. Dies kann die Abbildung durch gekrümmte Grenzflächen (Linsen) verständlicher machen.

Erfahrungen über den Einsatz des Programmes haben wir bisher mit Schülern, aber auch mit Studenten in der Grundausbildung (Computerpraktikum) und in der Lehrerfortbildung gewonnen. Kaum einem der Adressaten waren die oben geschilderten Effekte wirklich bekannt. In allen Fällen wirkte die Simulation wie eine Art Katalysator, der genaue Beobachtung initiiert: Man glaubte nicht recht, was der Computer zeigte und wollte es wirklich sehen, so daß in aller Regel eine Atmosphäre des emsigen Forschens und Entdeckens entstand – eine Atmosphäre, wie man sie sich für den Unterricht wünscht. Wir meinen, daß der Einsatz der Simulation hier einen für die Physik typischen Aspekt zeigt: Wenn die Naturgesetze (hier: Brechungsgesetz) erst einmal in mathematische Form gebracht sind (hier: das Pro-

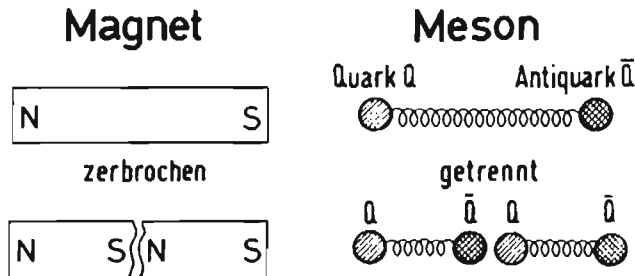
gramm), so zeigen sie uns den Weg zu neuen Erkenntnissen, die wir anders kaum gefunden hätten. Bei diesem Vorgehen kann uns der Computer entscheidende Unterstützung gewähren.

(Anschrift des Verfassers: Dr. Helmut Dittmann, Hans-Sachs-Gymnasium Nürnberg, Löbleinstr. 10, 8500 Nürnberg 10; Prof. Dr. Werner B. Schneider, Physikalisches Institut – Didaktik der Physik Universität Erlangen-Nürnberg, Staudtstr. 7, 8520 Erlangen)

Eingangsdatum: 13. 6. 1989

### Literatur

- [1] Born, M. „Optik“, Berlin 1972
- [2] Saxler J., „Zum Abbildungsfehler bei der Brechung an ebenen Grenzflächen“ PdN-Ph 2, 1989, S. 38–41
- [3] Bergmann-Schaefer, „Experimentalphysik, Optik“, Berlin 1978
- [4] Volz, H. „Zur Lichtbrechung“, Ph. u. D. 4 (1977) S. 340–342



Die Befreiung eines Quarks (z.B. von einem Antiquark) gelingt nicht („Quark-Einschluß“). An der „Bruchstelle“ bildet sich ein neues Quark-Antiquark-Paar. In ähnlicher Weise entstehen beim Zerschneiden eines Stabmagneten keine einzelnen Magnetpole, sondern Dipole mit je einem Nord- und einem Südpol.

(aus: Schopper, Herwig: Materie und Antimaterie. Teilchenbeschleuniger und der Vorstoß zum unendlich Kleinen. R. Piper GmbH & Co., München 1989)