In: Grebe-Ellis et al. (Hrsg.): open eyes 2005. Ansätze und Perspektiven der phänomenologischen Optik. Berlin: Logos 2006, S. 127 - 164

Reflexionen im Alltag –

Sehen lernen, was offen vor unseren Augen liegt

Schlichting, H. Joachim

Westfälische- Wilhelms- Universität Münster (schlichting@uni-muenster.de)

Kurzfassung
Das was wir sehen, hängt nicht nur davon ab, worauf wir blicken, sondern auch von der jeweiligen Lichtquelle, in deren Licht sie erscheinen. Streng genommen sieht man je nach der Oberflächenbeschaffenheit des betrachteten Gegenstandes eine mehr oder weniger verwickelte Überlagerung von Gegenstand und Lichtquelle.
Indem der Vielfalt von Glanz und Glimmer an alltäglichen Beispielen und künstlerischen Darstellungen physikalisch nachgegangen wird, soll der Blick geschärft werden für Phänomene, die normalerweise übersehen werden.

In dem, was sich mir so als Raum des Lichts darstellt,
bedeutet Blick immer ein Spiel
von Licht und Undurchdringlichkeit.
Es geht stets um ein Spiegeln
Jacques Lacan

Im Rahmen des Bildungsauftrages allgemein bildender Schulen soll Physik als Unterrichtsfach u.a. Hilfen bereitstellen, die natürliche und wissenschaftlich-technische Welt zu verstehen.
Die Umsetzung der darin enthaltenen Aufgabe setzt notwendigerweise voraus, dass Physik auf eben diese Welt bezogen wird und nicht in ihrem fachwissenschaftlichen Gehäuse gefangen bleibt. Die Ausbildungspraxis an Hochschule und Schule sieht i.A. anders aus.
Physikalische Zusammenhänge, Verfahren und darauf aufbauende Konzepte werden meistens an Geräten erarbeitet, die nur für diesen Zweck entwickelt wurden und außerhalb des Physikunterrichts keinerlei Bedeutung besitzen. Das so entwickelte physikalische Wissen reicht erfahrungsgemäß nicht aus, physikalische Aspekte in außerphysikalischen Kontexten also insbesondere im Alltag aufspüren. Denn die damit verbundene Leistung der Integration und Anwendung des Wissens ist nicht gelernt worden. Es wird die Schwierigkeit der Aufgabe unterschätzt, das Physikalische im Nichtphysikalischen sehen zu lernen und die auf Vorrat gelernten einzelfaktischen Wissenselemente zu einem komplexen Ganzen zu integrieren. Jedenfalls werden die Lernenden mit diesem schwierigen Problem weitgehend allein gelassen.
Vor diesem Hintergrund werden seit Jahren alternative Zugänge zur Physik propagiert, die darauf ausgerichtet sind, die Physik mit den Lebens- und Interessenbereichen der Lernenden zu verknüpfen [1].
Dazu gehört u.a. das „Lernen im Kontext“ das fast schon den Rang des sprichwörtlichen Zauberwortes angenommen hat.

Wenn vom Physiklernen im Kontext oder auch von Alltagsphysik die Rede ist, wird damit oft stillschweigend die Möglichkeit unterstellt, sich über eine anschauliche, weitgehend vertraute vereinfachte Version, gewissermaßen einer qualitativen Vorversion der Physik an die Physik heranzutasten.
Dahinter steckt die tief sitzende Überzeugung, die physikalische Sehweise sei letztlich eine elaborierte Form des Common Sense, die sich durch genaues Beobachten und Beschreiben aus der Lebenswelt entwickelt habe und von jedem, der nur genau genug beobachtet und scharf nachdenkt erreicht werden kann.
Diese Ansicht verkennt die grundlegende Differenz zwischen lebensweltlicher und physikalischer Sehweise [2], die sich vor allem in folgenden didaktischen Problemen äußert:
Das Alltägliche ist vertraut und selbstverständlich, es enthält keine offenen Fragen. Ein physikalischer Zugang setzt gewissermaßen voraus, Selbstverständlichkeiten zu hinterfragen und dem an sich Nichtphysikalischen einen physikalischen Aspekt abzuringen. Denn Alltägliches ist physikalisch gesehen komplex. Die physikalischen Probleme treten hier weder fachsystematisch noch nach dem fachlichen Schwierigkeitsgrad geordnet auf.
Ein physikalischer Zugang erfordert daher die Fähigkeit, physikalische Grundgesetze aus den verschiedensten Bereichen in komplexen Zusammenhängen erkennen und anwenden zu können.
Um dieses Problem zu verdeutlichen, betrachten wir als Beispiel den weitgehend vertrauten Anblick unter dem von Sonnenlicht durchströmten Blätterdach von Bäumen (Abb. 1). Für Schülerinnen und Schüler ist das nichts Besonderes. Sie erkennen darin normalerweise nur ein Wechselspiel von Licht und Schatten. Selbst wenn nachgefragt und insbesondere auf die rund geformten Lichtflecken aufmerksam gemacht wird, sind die ehrlichsten Äußerungen von der Art: „Das ergibt sich halt so“ [3].

In: Grebe-Ellis et al. (Hrsg.): open eyes 2005. Ansätze und Perspektiven der phänomenologischen Optik. Berlin: Logos 2006, S. 127 - 164

Erst wenn die vertraute Situation aus einer unvertrauten Perspektive wahrgenommen wird, kann es gelingen, Aufmerksamkeit und Interesse zu wecken gefolgt von dem Bemühen, eine Erklärung zu finden. Denn "das Seltsame fordert uns heraus, und wir fordern ihm das Einfache ab" [4].
Im vorliegenden Beispiel bietet es sich an, den Schülerinnen und Schülern Bilder vorzulegen, die den Licht- und Schattenbereich unter dem Blätterdach

Abb. 1: Typischer Anblick von Sonnentalern unter dem Blätterdach von Bäumen.

Abb. 2: Sonnensicheln aufgrund einer Sonnenfinsternis auf einer Asphaltstraße

von Bäumen bei einer Sonnenfinsternis (Abb. 2) oder in einer Situation zu zeigen, in der die Sonne von scharf begrenzten Wolken partiell verdeckt ist. Auch wenn die auffällige Sichelform zunächst zu der (faktisch unzutreffenden, aber im Prinzip angemessenen) Vermutung führt, der Sichelmond sei der „Verursacher“, reicht die Verschiebung der Perspektive von der Lochform im Blätterdach der Bäume zur Form der Lichtquelle aus, in den runden Lichtflecken schließlich die Form der Lichtquelle, also der Sonne zu erkennen.
Über den Umweg der unvertrauten, weil nicht alltäglichen Situation einer Sonnenfinsternis sieht man plötzlich das Vertraute, also das, was man schon immer sah, wie zum ersten Mal.
Die Gefahr einer fachlichen Überforderung tritt insbesondere dann zutage, wenn es sich um Alltagsphänomene bzw. -gegenstände handelt, die nicht nur physikalische Kenntnisse aus verschiedenen Bereichen erfordern, sondern darüber hinaus auf starke Elementarisierungen angewiesen sind. Das ist zum Beispiel der Fall, wenn man sich technischen Objekten wie etwa dem Mobiltelefon zuwendet. Ein unterrichtlicher Zugang würde erfordern, dass man Probleme identifiziert, die auf physikalische Untersuchungen hinauslaufen. So wäre es im vorliegenden Fall denkbar, anhand des Mobiltelefons das Problem zu verfolgen, Sprache auf gezielte und offenbar nicht akustische Weise zu einem fernen Ort zu transferieren. Dieses Problem würde dann in zahlreiche weitere Probleme zerfallen, von denen die Umwandlung von akustischer in elektrodynamische Information und deren Realisierung in einer komplexen elektronischen Schaltung nur eines, wenn auch sehr wichtiges wäre.
Hat man das Ausgangsproblem auf diese Weise aufgeschlüsselt und ein qualitatives Verständnis des Kontextes aufgebaut, wäre es dem Unterricht anheim gestellt, den einen oder anderen Aspekt weiter zu vertiefen bis hin zu quantitativen Untersuchungen.
Das mag als zeitraubender Umweg angesehen werden. Ein alltagsorientierter Physikunterricht, der mit dem Slogan „Der Alltag ist physikalisch“ so etwas wie die Selbstverständlichkeit einer Verbindung zwischen physikalischen Inhalten und dem Alltagsleben behauptet, läuft Gefahr mehr zu schaden als zu nützen. Da eine Verbindung zwischen Physik und Alltag an sich nicht besteht (siehe oben) muss sie auf nachvollziehbare Weise an konkreten Beispielen konstruiert werden. Ansonsten würden die Schülerinnen und Schüler in ihrem Vorurteil bestärkt, für Physik nicht geeignet zu sein, weil sie selbst das Offenbare nicht zu sehen in der Lage sind.
Ein weiteres eher lerntheoretisches Argument dafür, Physik und Alltag in Verbindung zu bringen, besteht in der Möglichkeit der Wiederbegegnung der Lernenden mit Gegenständen des Physikunterrichts außerhalb der Schule. Auf diese Weise bliebe das Physiklernen nicht auf typischerweise zwei Stunden pro Woche beschränkt, was gleichbedeutend wäre mit einem schnellen Verfall des Gelernten.
Vor diesem Hintergrund soll im folgenden an einfachen visuellen Phänomenen demonstriert werden, auf welche Weise der Blick für physikalische Sachverhalte im Alltag geschärft und umgekehrt das Alltägliche durch die Wahrnehmung von physikalischen Aspekten aufgewertet und erlebnismäßig bereichert werden kann.
Indem wir uns zunächst auf das konzentrieren, was wir sehen, wenn wir etwas sehen und wie wir es sehen, lenken wir unsere Aufmerksamkeit auf Reflexionen, jene optischen und gedanklichen Vorgänge, die beim Sehen und Verstehen der sichtbaren Welt eine wesentliche Rolle spielen.
Unter Reflexionen verstehen wir sowohl diffuse Reflexionen als auch spiegelnde Reflexionen. Erstere treten an rauen oder matten Oberflächen auf und sind im Allgemeinen mit Absorptionen verbunden, die den Gegenstand bei Bestrahlung mit weißem

In: Grebe-Ellis et al. (Hrsg.): open eyes 2005. Ansätze und Perspektiven der phänomenologischen Optik. Berlin: Logos 2006, S. 127 - 164

Licht in seiner natürlichen Farbe sichtbar machen. Letztere erfolgen an glatten Oberflächen.
Es wird sich zeigen, dass unsere Wahrnehmung ganz wesentlich durch ein komplexes Wechselspiel beider Arten von Wechselwirkung von Licht und Materie bestimmt wird.

1. Das Unvertraute im Vertrauten sehen lernen – eine Granitschale als Blickfang

Im Lustgarten von Berlin steht eine riesige Granitschale, die heute nicht weiter auffällt, weil ihr Glanz in den 180 Jahren ihres Bestehens größtenteils verloren gegangen ist (Abb. 3). Einen Eindruck davon, wie die Schale einmal ausgesehen hat, vermittelt ein Gemälde von Johann Erdmann Hummel aus dem Jahre 1832, das die Schale zugleich in ihrer natürlichen Farbe und aus einem jeweils optimalen Blickwinkel als fast perfekten Spiegel erscheinen lässt (Abb. 4 und Abb. 5).
Dies ist keine künstlerische Freiheit, sondern – wenn auch meistens in weniger starker Ausprägung – typisch für das optische Verhalten der Oberfläche eines beliebigen Gegenstandes: Das auffallende weiße Licht wird vom Gegenstand absorbiert und in dem Wellenlängenbereich, der die Farbe des Gegenstandes bestimmt, diffus reflektiert. Wenn die Oberfläche jedoch glatt poliert ist, wird ein mehr oder weniger großer Anteil des Lichtes spiegelnd reflektiert[1].
Eine deutliche Spiegelung ist aber nur dann zu beobachten, wenn das von dem gespiegelten Gegenstand ausgestrahlte Licht, wesentlich intensiver ist[2], als das vom spiegelnden Gegenstand diffus reflektierte Licht. Ob diese Bedingung erfüllt ist, hängt nicht nur von der Glätte und dem Absorptionsvermögen des spiegelnden Gegenstandes ab, sondern auch von der Lichtintensität des gespiegelten Gegenstands im Verhältnis zur Intensität der (direkten) Lichtquellen, wie etwa der Sonne, deren Licht vom reflektierenden Gegenstand diffus reflektiert wird.
Konkret: Das Gesicht des Mannes mit dem Handstock (Abb. 5) wird so hell beleuchtet, dass es am beschatteten Boden der Granitschale wie in einem Spiegel reflektiert wird. Da im beschatteten Bereich kaum Streulicht auftritt, wirkt dieser Bereich wie ein fast perfekter Spiegel. Statt eines Teils der Granitschale sieht man den kopfstehenden Kopf eines sein Spiegelbild betrachtenden Mannes.
Anders ist es beim Soldaten im Vordergrund. Sein anamorphotisch verzerrtes Spiegelbild hebt sich nur undeutlich aus dem granitfarbenen Untergrund heraus. Denn er steht im Schatten und trägt dunkle Kleidung, so dass er nur wenig Licht zur Schale strahlt.

Abb. 3: Granitschale im Berliner Lustgarten

Abb. 4: Granitschale von Johann Erdmann Hummel im Jahre 1832 gemalt.

Abb. 5: Ausschnitt aus Abb. 4

[1] Wir sprechen im Folgenden von diffuser und spiegelnder Reflexion, was im deutschsprachigen Raum oft mit Streuung und Reflexion umschrieben wird.

[2] Wir betrachten im folgenden jeden Gegenstand als (indirekte) Lichtquelle, ohne dass immer hervorzuheben. Eine solche Lichtquelle ist umso heller, je intensiver sie von einer direkten Lichtquelle bestrahlt wird und weniger Licht sie absorbiert.

In: Grebe-Ellis et al. (Hrsg.): open eyes 2005. Ansätze und Perspektiven der phänomenologischen Optik. Berlin: Logos 2006, S. 127 - 164

Obwohl Spiegelungen bei glatten Gegenständen sehr ausgeprägt sind, nimmt man sie in der Regel kaum als solche wahr. Vielmehr erkennt man, dass der Gegenstand glänzt, eine Eigenschaft, die nicht un-

Abb. 6: Granitschale im vatikanischen Museum, die selbst bei mäßiger Beleuchtung eine deutliche Spiegelung des Fußbodens zeigt.

wesentlich zum Eindruck der Form des Gegenstandes beiträgt. Ein wesentlicher Grund für die Unauffälligkeit von Spiegelbildern als solche liegt nicht nur darin, dass die gerundeten Formen zu anamorphotischen Verzerrungen führen, sondern auch daran, dass man kein Spiegelbild erwartet.
Der Maler der Granitschale hat offenbar gerade das Phänomen der Spiegelung in den Blick genommen, auf das in dem Gemälde durch die ihre eigenen Spiegelbilder betrachtenden Personen aufmerksam gemacht wird. Die unverzerrte Spiegelung am glatten Boden der Schale erleichtert den Blickwechsel vom Glanz der Schale zum Spiegelbild eines Gegenstandes der Umgebung.

2. Wenn Fußböden zum Spiegel werden

Manchmal wird die Meinung vertreten, der Maler habe den spiegelnden Effekt übertrieben dargestellt.

Abb. 7: Polierter Granit macht einen Fußboden zum Spiegel der hellen Umgebung.

Diesem Argument kann man zum einen damit begegnen, dass es ältere Granitschalen gibt, die ihren spiegelnden Glanz behalten haben (Abb. 6). Zum anderen findet man im Alltag der wissenschaftlich-technischen Welt auch heute wieder in zunehmendem Maße die Verwendung spiegelnder Flächen, vor allem von Fußböden (Abb. 7), als architektonisches Gestaltungsmittel vor.

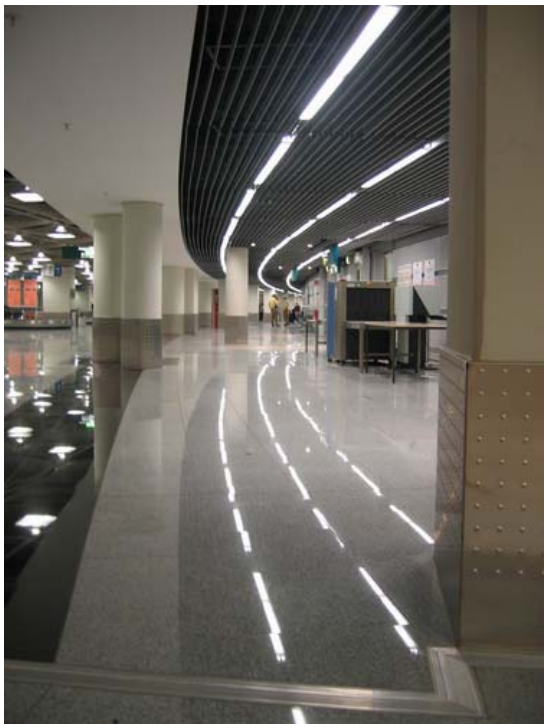

Abb. 8: Eben oder in Stufen abwärts?

Dass diese Spiegelungen unter günstigen Lichtverhältnissen ziemlich deutlich sind, zeigt die gespiegelte Fassade der gegenüberliegenden Häuserfront. Da diese im hellen Sonnenlicht liegt, strahlen sie mit verhältnismäßig hoher Intensität, was zu entsprechend starken Reflexionen führt. Sie sind jedenfalls so ausgeprägt, dass die gleichzeitig auftretende Absorption und die diffuse Reflexion des Fliesenbodens, in den Hintergrund treten.
Im Vordergrund des Fotos dominieren aufgrund der spärlicheren Beleuchtung die Absorption und die diffuse Reflexion, so dass die natürliche Farbe des Fußbodens deutlich hervortritt.
Die Spiegelungen auf Fliesenböden können - insbesondere bei ungewöhnlichen Deckenformationen – und Beleuchtungen täuschend echt sein, im wahrsten Sinne des Wortes. So wurden wir in einem modernen Flughafengebäude auf eine ältere Dame aufmerksam, die sich angesichts der in etwa in Abb. 8 wiedergegebenen Situation mühselig vorantastete, weil sie glaubte, es mit nicht einzuschätzenden versetzten Ebenen bzw. Treppen zu tun zu haben. Aber der Fußboden war in Wirklichkeit nicht uneben, sondern im Gegenteil extrem glatt.
Die spiegelnden Fliesenböden erfreuen sich nicht nur in unseren Tagen großer Beliebtheit. Abb. 9 zeigt ein Gemälde der Delfter Schule, auf dem nicht

nur der blanke dunkle Boden von den hellen Gegenständen der Umgebung „erzählt“, sondern spiegelnde Reflexionen an zahlreichen anderen Stellen wahrzunehmen sind.
Man betrachte beispielsweise die Reflexion des Kleides der Dame auf dem Boden im Vordergrund des Bildes.
Es fällt auf, dass nur die schwarzen Fliesen nahezu perfekt spiegeln. Ohne Kenntnis des Kontexts könnte man an dieser Stelle nicht erkennen, dass die

Abb. 9: Gemälde der Delfter Schule (1660-5). Das Bild enthält zahlreiche optische Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen (indirekten) Lichtquellen.

Fliesen schwarz sind. Damit wird einmal mehr gezeigt, dass ein (perfekter) Spiegel keine Farbe hat. In diesem Fall tritt neben der spiegelnden Reflexion nur noch die Lichtabsorption auf[3]. Die diffuse Reflexion entfällt fast vollständig.
Demgegenüber ist die diffuse Reflexion der weißen Fliesen bei gleichen Lichtverhältnissen so dominant, dass dort die spiegelnde Reflexion vollständig überstrahlt wird.
Nur in den beschatteten Bereichen, in die in die so gut wie kein Tageslicht gelangt, werden auch die weißen Fliesen zum Spiegel. Das Kleid wird auch hier deutlich gespiegelt, weil es die einzige helle Lichtquelle darstellt, die in den Schatten hineinstrahlt.
Weitere spiegelnde Reflexionen treten beispielsweise an den Tapeten im Hintergrund auf. Weil hier das helle Fenster als Lichtquelle und gespiegeltes Objekt verantwortlich ist, erkennt man keine Struktur, sondern nur eine Aufhellung, in der die gelbe Färbung und die Struktur der Tapete verloren gehen.
Ein interessantes Wechselspiel von spiegelnder und diffuser Reflexion führt der Maler auch in dem Messingteil am Kamin vor. Die Kugel ist zwar nicht völlig matt und verliert auch da nicht ganz ihre Mes-

Abb. 10: Ausschnitt aus Abb. 9

singfarbe, wo sie die helleren Lichtquellen als Aufhellungen reflektiert. Der linke Fleck verweist eindeutig auf das Fenster links im Bild. Die gerade noch zu unterscheidenden drei nicht ganz so hellen Flecken auf der rechten Seite verweisen auf Lichtquellen, deren Existenz nur aus diesen Reflexen erkannt werden kann.
Vermutlich handelt es sich um Fenster auf der rechten Seite. Während diese Lichtquellen im bloßen Glanz untergehen, erscheint der Fußboden anamorphotisch verzerrt gespiegelt. Diese Verzerrungen der spiegelnden Reflexe des einfachen Fußbodenmusters tragen trotz der Undeutlichkeit der Reflexe infolge des verhältnismäßig großen Anteils an diffuser Reflexion wesentlich dazu bei, die Kugel als solche erkennbar zu machen. Aufgrund der Einfachheit der Verzerrungen werden sie vom visuellen System gewissermaßen direkt in die Form der Kugel übersetzt.
Aber die Messingkugel reflektiert nicht nur den Fußboden, dieser reflektiert in seinen dunklen Flie-

[3] Die Absorption fällt in dem Gemälde weniger auf als es beispielsweise bei einer Fotografie derselben Situation der Fall wäre und wie man andeutungsweise an den starken Intensitätsunterschieden in Abb. 7 erkennt. Der Grund dafür liegt darin, dass das Auge des Malers sich automatisch den geänderten Lichtverhältnissen anpasst. Beim Blick auf den dunklen Fußboden sind die Pupillen weiter geöffnet als beim Blick auf des helle Kleid. Das Gemälde setzt sich so gesehen aus unterschiedlich „belichteten“ Teilen zusammen.

sen auch die Kugel. Dabei werden interessanterweise vor allem die Teile reflektiert, die durch spiegelnde Reflexe der umgebenden Fenster erhellt werden. Letztlich handelt es sich um Reflexe von Reflexen, die allerdings durch ihre Anordnung und Nuancierung in der Helligkeit weniger die primäre als vielmehr die sekundäre Lichtquelle zu erkennen geben.
Bei der in diesem Bild zum Ausdruck kommenden Lust des Malers an Reflexionen, wundert man sich kaum noch, wenn die einzige echte Spiegelung durch einen veritablen Spiegel (im Hintergrund des Bildes) als letztes in den Blick kommt. Oder handelt

Abb. 11: Reflexionen in einem Kaufhausfenster

es sich um ein echtes Bild?

3. Anamorphosen im Alltag und in der Kunst

Aber man muss nicht erst in die Kunstgalerie gehen, um sich an Reflexen zu erfreuen. Unsere wissenschaftlich- technische Welt ist geradezu erfüllt von spiegelnden Reflexionen.
Ein Blick in die Auslagen eines Haushaltswarenge-

Abb. 12: Fraktale Wada - Bassins: Reflexionen von Reflexionen von Reflexionen... in sich gegenüber liegenden Kugelspiegeln.

schäftes zeigt zahlreiche Formen von Reflexionen, von denen wir nur einige nennen wollen (Abb. 11): Die beiden verspiegelten Vasen stellen Wölbspiegel dar, die jeder für sich fast die ganze Umgebung abbilden. Das bläulich eingefärbte Oval stellt das anamorphotisch verformte Schaufenster von innen gesehen dar, in dem die Straße mit dem Fotografen und einem Teil des blauen Himmels zu sehen ist.
Dieses Oval wird umrahmt von den Abbildungen der Dinge, die sich innerhalb des Fensters befinden. So bilden sich die Vasen mit ihren Spiegelungen gegenseitig ab, was – wie man an verspiegelten Weihnachtskugeln leicht nachvollziehen kann – zu Abbildungen von Abbildungen von Abbildungen … ad infinitum und damit zu fraktalen Gebilden führt, so genannten Wada- Einzugsbereichen führt (Abb. 12)[5].
Auf den spiegelnden Gegenständen erkennt man mehr als direkt zu sehen ist. So zeigen sich am oberen Rand des auf den Vasen abgebildeten Schaufensters Spotlights, vermutlich von Halogenlampen, die für einige der Lichtbahnen auf den Metallstreifen im Vordergrund verantwortlich sind. Diese Lichtbahnen verdanken sich winzigen, ohne Hilfsmittel kaum zu erkennenden parallelen Riefen im Metall, die Rückschlüsse auf die Herstellung der spiegelnden Metallbänder erlauben [6].
Außer den durch die gelblichen Lampen hervorgerufenen Lichtbahnen beobachtet man leicht bläuliche Bahnen, die durch das Himmelslicht hervorgerufen werden. Interessant sind weiterhin die anamorphoti-

Abb. 13: Dunkle Karosserien bilden die Umgebung oft in großer Perfektion ab.

schen Verzerrungen, die sich vor allem an geraden Gegenständen wie dem Kerzenlöscher im Vordergrund in den Vasen erkennen lassen. Aufgrund des Wechsels von konkaver und konvexer Krümmung im Bereich des Fußes der Vasen hat man abwechselnd aufrechte und Kopf stehende Abbildungen, wie sie insbesondere an der Abbildung des Fotografen zu erkennen sind.
Blanke Autokarosserien stellen einen weiteren interessanten Alltagsgegenstand dar, der – wenn man ihn als „Spiegel“ wahrnimmt – erstaunlich gute Abbildungen hervorbringt. Wählt man einen geeigneten Ausschnitt einer Karosserie, so dass weite Bereiche durch die Spiegelung „abgedeckt“ werden, ist es unter Umständen unmöglich, die ursprüngliche Farbe des Fahrzeugs zu erkennen. Im vorliegenden

Fall (Abb. 13) handelt es sich nicht etwa um eine blaue Karosserie, sondern um eine schwarze. Das Blau ist nichts als der gespiegelte Himmel. Hier zeigt sich einmal mehr, dass schwarze Flächen wegen ihres geringen Anteils an diffus reflektiertem Licht besonders gute „Spiegel“ darstellen. Spiegelnde Reflexionen auf hellen Karosserien sehen daher

Abb. 14: Hohlspiegelartiger Abschnitt einer Autokarosserie

Abb. 15: Die Verformungen der Spiegelbilder „linearer“ Objekte offenbaren die Form der Karosserie.

meist sehr verwaschen aus.
Betrachtet man die Spiegelbilder auf den Karosserien genauer, so entdeckt man auch auf dem Kopf stehende Ansichten. Diese „Entdeckung“ kann im Unterricht zum Anlass genommen werden, Hohl- und Wölbspiegel als zwei prinzipiell verschiedene Idealgestalten deformierender Spiegel kennen zu lernen.
Auf diese Weise kann zum einen der physikalische Hintergrund nicht ebener spiegelnd reflektierender Oberflächen zu einem Zeitpunkt behandelt werden, zu dem er benötigt wird, um Ordnung in die Erscheinungen alltäglicher Ansichten zu bringen. Zum anderen kann die wichtige Rolle der Idealgestalten in der Physik verdeutlicht werden: An Hohl- und Wölbspiegel können *auf einfache Weise* die wesentlichen physikalischen Prinzipien (ggf. auch quantitativ) erarbeitet werden, ohne dass auf die zahlreichen in der Realität vorkommenden Varianten einzeln eingegangen werden müsste.

Wer Kinder und Jugendliche in Science Centern erlebt hat, wie sie mit Freude und Spaß sich selbst und anderen in Zerrspiegeln betrachten, wird sich vielleicht wundern, sie nicht öfter vor Autos posieren zu sehen (Abb. 17). Auf diese Weise werden bei der Analyse von reflektierenden Oberflächen im Alltag nicht nur Physik und Alltag verbunden, mit dem didaktisch gar nicht hoch genug einzuschätzenden Vorteil, dass physikalische Inhalte aus der räumlichen und zeitlichen Begrenzung des Physikunterrichts befreit werden. Darüber hinaus werden Physik und Spaß am (Vexier-) Spiel miteinander verknüpft, was lerntheoretisch von großem Nutzen ist.

Abb. 17: Kinder vor einem Zerrspiegel

Betont sei noch einmal, dass man es erst einmal lernen muss, glänzende Autokarosserien als Spiegel zu sehen. Erst dann kann erkannt werden, dass diese Spiegelungen die Karosserie mit Bildern bedecken, die in Einzelfällen wie gemalt aussehen und die Eigenfarbe des Autos zum Teil großflächig Verschwinden bringen.

Abb. 16: Bernhard Heiliger: Großer Phönix III 1992

Doch der Verlust an Farbe, über den sich ein Autobesitzer beklagen würde, wenn es dauerhaft wäre, hat neben dem ästhetischen Aspekt, dem der Glanz ja in erster Linie dienen soll, einen ganz praktischen Aspekt: An den Verzerrungen bekannter Objekte kann man indirekt die Form der Karosserie erkennen, was direkt rein visuell gar nicht möglich ist. Besonders „lineare“ Gegenstände lassen aufgrund ihrer intuitiven Einfachheit unmittelbare Rückschlüsse auf die Form zu. Es ist fast so, als sähe man die Form an der Verformung des Spiegelbildes (Abb. 15).

Darin kann man außerdem einen Bezug zur physikalischen Forschung sehen. Bei der Untersuchung unbekannter Oberflächen schaut man sich grob gesprochen die Reflexe bekannter Strahlung an und interpretiert aus den „Verformungen“ die Struktur der Oberfläche heraus. Der Unterschied besteht darin, dass man beim Auto direkt überprüfen kann, ob der Rückschluss aus der Reflexion zutreffend ist, was in der Oberflächenphysik nicht möglich ist. Auf dieser Basis ließe sich zumindest ein grobes Verständnis dessen anbahnen, was in der physikalischen Forschung passiert.

Abb. 18: Ausschnitt aus Abb. 16, der erkennen lässt, dass das Kunstwerk vor allem durch verzerrte Spiegelungen der Umgebung entsteht.

Die ästhetische Dimension verformenden Spiegelungen, wie sie bei Autokarosserien relativ profan zutage treten, wird auch in der Kunst ausgenutzt. In einer Skulptur von Bernhard Heiliger, die im Zollernhof (Unter den Linden, Berlin) zu sehen ist (Abb. 16 und Abb. 18), wird die verzerrt gespiegelte Umwelt zum integralen Bestandteil eines Kunstwerks.

4. Wässrige Spiegel im Alltag

Alltagsspiegelungen treten nicht nur auf festen Oberflächen auf. Reflektierende Wasseroberflächen zeigen oft sehr beeindruckende optische Phänomene, die ebenfalls meist übersehen werden.

Immer dann, wenn sich (zum Beispiel bei Regen) glatte Wasserflächen gebildet haben oder Gegenstände von einem dünnen Wasserfilm überzogen sind, kann man beobachten, dass helle Objekte eine Spiegelwelt unter dem Pflaster hervorrufen (Abb. 19). Zum einen hat man es mit spiegelnden Reflexionen auf der Wasseroberfläche von Wasserpfützen zu tun, die aufgrund ihrer ebenen Oberfläche unverzerrte Ansichten bieten. Obwohl die Wasseroberfläche je

Abb. 19: Spiegelbild unter dem Pflaster

Abb. 20: Unterirdische Grotte in Lanzarote

nach Einfallswinkel nur einen mehr oder weniger geringen Anteil des Lichtes reflektiert, erscheint die Spiegelung oft perfekt, weil das in das Wasser eintretende Licht durch den dunklen Untergrund fast vollständig absorbiert wird und deshalb kaum als störendes Streulicht zurückkommt. Zum anderen beobachtet man glänzende Pflastersteine, die ihrer Form entsprechend zu verzerrten Spiegelungen führen können. Entscheidend ist hier, dass das Wasser die normalerweise raue Oberfläche der Steine glättet und damit eine wichtige Bedingung für eine spiegelnde Reflexion erfüllt. In Abb. 19 sind die Steine allerdings bereits so weit getrocknet, dass nur noch ein schemenhafter Glanz in der Farbe des re-

flektierten Gegenstandes zu beobachten ist. Glanz und Farbintensität feuchter Steine sind eine weiteres interessantes Reflexionsphänomen, das hier jedoch nur erwähnt werden soll (siehe z.B. [7]).
Obwohl Spiegelungen auf Wasserpfützen oft erstaunlich perfekt sind, kann es aufgrund des Kontextes nicht zu Verwechslungen mit dem Original kommen. Anders ist es, wenn solche Spiegelungen in unvertrauten Umgebungen vorkommen. So glaubt man beispielsweise in einer unterirdischen Grotte (Abb. 20) vor einem Abgrund zu stehen, obwohl es sich nur um eine Spiegelung des Deckengewölbes in einer wenige Zentimeter flachen Wasserschicht handelt.
Die Täuschung wird dadurch perfekt, dass sich Decke und Boden einer Grotte stark ähneln. Da die Felswände von so komplexer Form sind, dass sie nicht sofort wieder erkannt werden können und Unterschiede nicht unmittelbar ins Auge fallen, lässt sich der Abgrund auf den ersten Blick nicht als gespiegeltes Deckengewölbe identifizieren. Bei einer

Abb. 21: Spiegelungen eines Segelboots auf dem leicht welligen Wasser.

einfachen gespiegelten Zimmerdecke wäre dies sofort aufgefallen.
Aber nicht nur glatte Wasseroberflächen verwandeln sich unter geeigneten Bedingungen in Spiegel. Leicht welliges Wasser kann zu deformierten Spiegelungen der hellen Umwelt führen und Bilder hervorrufen, die an eine dynamische Variante glänzender Karosserien erinnern (Abb. 21).
Die Überlagerung des Wassers mit Spiegelbildern der Umgebung ist in diesen Fällen sogar so groß, dass es dem an sich farblosen Wasser eine Farbe zu verleihen scheint[4]. Die „Farbe“ des Wassers wechselt demnach je nach der Umgebung.
An diese Einsicht kann sich die Erkenntnis anschließen, dass transparente Medien wie Wasser und Glas vor allem durch Reflexionen der hellen Umwelt sichtbar werden. Als Beispiel sei hier ein Foto von Gläsern angegeben (Abb. 22), die erst durch Reflexe sichtbar werden, die die Transparenz einschränken.

[4] Größere Mengen reinen Wassers zeigen eine schwache Eigenfarbe im blauen Bereich.

Wenn die Reflexe nicht deutlich genug sind, kann es zu Täuschungen kommen. Schon mancher ist gegen eine Glastür gelaufen, weil ihm die Reflexe entgingen.
Selbst Tiere werden zuweilen Opfer von Täuschungen. So kommt es immer wieder vor, dass Vögel mit Fensterscheiben kollidieren, weil entweder die Reflexionen in der Scheibe zu unauffällig sind oder die täuschend echte Spiegelung des Himmels eine reale Welt hinter der Scheibe suggeriert. Auch Tiere müssen lernen, die Spiegelwelt von der Realwelt zu unterscheiden.

Abb. 22: Gläser werden durch vielfältige Reflexe erst sichtbar. .

5. Fensterscheiben als transparente Spiegel

Die Bedeutung der Fensterscheiben liegt in ihrer Transparenz für sichtbares Licht bei gleichzeitiger Undurchdringlichkeit für Wind und Wetter. Dazu ist auch der Umstand zu rechnen, dass Fensterglas für infrarote Strahlung undurchsichtig ist und somit hilft, Wärmeverluste zu verringern.
Indessen ist die Transparenz nicht hundertprozentig.

Abb. 23: Fenster als fast perfekter Spiegel

Ein kleiner Teil der Strahlung wird absorbiert und ein weiterer kleiner Teil, 4% pro Grenzfläche, wird reflektiert. Dies wäre der Erwähnung nicht wert, wenn nicht der Reflexion eine ihre quantitative Geringfügigkeit weit übersteigende Bedeutung zukäme. Ihr ist es nämlich zu verdanken, dass man die Scheibe überhaupt sieht, was vor allem bei Glastüren einen kaum zu überschätzenden Nutzen hat.

Blickt man an einem hellen Tage von außen in einen Raum, so kann die Fensterscheibe zu einem fast perfekten Spiegel der äußeren Umgebung werden (Abb. 23). Wie verträgt sich dieser Befund mit dem so geringen Reflexionsvermögen von Glasscheiben?
Damit Gegenstände hinter den Scheiben gesehen werden können, muss von ihnen Licht ausgehen und das Auge des Betrachters erreichen. Dazu muss (bei nicht anderweitig beleuchtetem Raum) das Licht zunächst von der hellen Außenwelt durch die Scheibe ins Innere gelangen.

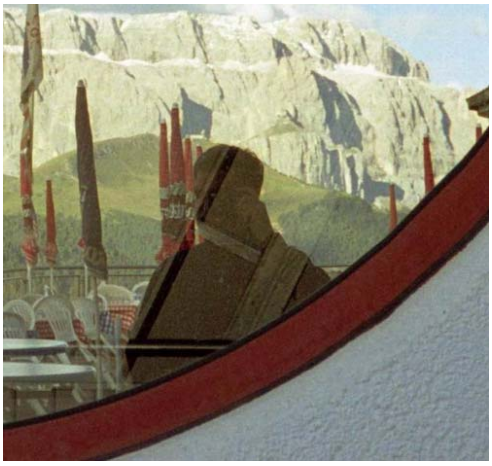

Abb. 24: Ein Schatten auf dem Fenster reist ein Loch in die spiegelnde Reflexion.

Abb. 25: Ein Vorgang im Fenster „verdeckt“ auch das Spiegelbild.

Obwohl dies bei einfacher Verglasung immerhin zu über 90% der auftreffenden Strahlung geschieht, kommt im Allgemeinen wenig Licht zurück. Denn das aus einer Richtung durch die Scheibe einfallende Licht wird von den Gegenständen in alle Richtungen diffus reflektiert und dabei teilweise absorbiert. Nur ein geringer Teil des Lichtes wird in Richtung des Fensters nach außen gestrahlt, insbesondere dann, wenn der Raum dunkel möbliert ist. Ist der von innen durch das Fenster wieder austretenden Anteil wesentlich geringer als der Anteil der an der Scheibe spiegelnd reflektiert wird, dominiert die Spiegelung. In einem solchen Fall würde ein geöffnetes Fenster wie ein schwarzes Loch wirken.
Allgemein kann man sagen: Ein Fenster wird zu einem umso perfekteren Spiegel

Abb. 26: Reflexionen von Reflexionen beim Blick in ein Fenster.

- je heller die sich spiegelnden Gegenstände,
- je dunkler die Gegenstände im Raum sind und damit umso geringer die diffuse Reflexion von innen ist.

Besitzt das Fenster Gardinen, so wird ein großer Teil des einfallenden Lichtes direkt reflektiert und die Spiegelung der hellen Außenwelt entsprechend überlagert (Abb. 25).
Dunkle Gegenstände der Außenwelt, beispielsweise im Schatten liegende Objekte oder der Schatten einer Person, die sich in der Scheibe spiegelt, reißen Löcher ins Spiegelbild und ermöglichen den Durchblick durch die Scheibe nach innen (Abb. 24). In diesem Fall ist die Intensität des von außen kommenden Lichtes so gering, dass die Intensität des an der Scheibe reflektierten Lichtes unter die des von innen kommenden Lichts fällt. Daraus erklärt sich auch das Bemühen von Jemand, der an einem hellen Tag durch ein spiegelndes Fenster in ein Zimmer hineinschauen möchte, mit angelegten Händen den eigenen Schatten durch Abschirmen von Licht zu verstärken.
Jemand der sich unter diesen Bedingungen in einem Zimmer befindet und nach außen schaut, hat natür-

lich einen guten Durchblick durch die Scheibe. Denn er sieht das von den hellen Gegenständen ausgehende Licht und wird aufgrund des geringen Streulichts aus dem verhältnismäßig dunklen Zimmer so gut wie gar nicht durch spiegelnde Reflexionen an der Scheibe gestört.
Bei Dunkelheit, wenn die Wohnung durch künstliches Licht beleuchtet wird, kehren sich die Verhältnisse natürlich um. Nun wird jemand aus dem hellen Innern durch die Spiegelungen an der Scheibe daran gehindert, das von den dunklen Gegenständen der Außenwelt ausgehende Licht geringer Intensität wahrzunehmen. Passanten auf der dunklen Straße können demgegenüber das Geschehen im hellen Zimmer wie auf einer Bühne beobachten – bis die Gardinen oder Jalousien zugezogen werden.
Kirchenfenster entfalten Ihre Farbenpracht nur im

Abb. 27: Manchmal sieht die Spiegelwelt ganz schön real aus.

Abb. 28: Nur durch den Kontext lässt sich entscheiden, was innen und außen ist.

Innern der Kirche. Von außen sehen sie meist schmucklos aus, weil u.a. eine dicke Staubschicht „Verzierungen“ durch Spiegelbilder der Außenwelt verhindern. Auch diese Asymmetrie verdankt sich den unterschiedlichen Lichtintensitäten innen und außen.

Abb. 29: Verkleinertes und vergrößertes Bild durch konvex und konkav gebogene Scheiben.

Spiegelungen an Fensterscheiben können selbst Gegenstand von Spiegelungen an anderen Fensterscheiben sein. Dann blickt man in eine Scheibe und sieht Spiegelungen von Spiegelungen usw. Es entstehen Bilder, die eher an moderne Kunst als an Fensterscheiben erinnern (Abb. 26).
Wenn die Intensität des spiegelnd reflektierten Lichtes an einer Scheibe von derselben Größenordnung ist wie das von den Gegenständen im Innern ausgehenden Licht, dann ergeben sich teilweise lustige Überlagerungen von Innen- und Außenansichten, die lediglich unter Einbeziehung des Kontextes auseinander gehalten werden können (Abb. 28).

6. Fensterscheiben als Hohl- und Wölbspiegel

Die zunehmende Ersetzung von einfach verglasten durch doppelt verglaste Fenster hat wärmetechnisch gesehen große Vorteile. Was die Qualität der Spiegelungen betrifft, so macht sich die Überlagerung zweier Spiegelbilder an der vorderen und hinteren Scheibe störend bemerkbar (Abb. 29.). Allerdings wird – jedenfalls aus physikalischer Sicht – dieser „Nachteil“ durch einige neue Phänomene mehr als aufgewogen.

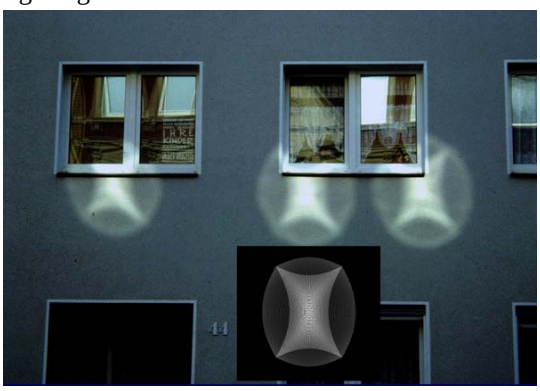

Abb. 30: Lichtkreuz im Lichtkreis – Lichtfokussierung und – defokussierung durch gewölbte Doppelscheiben. (Unten im schwazen Kasten: Einblendung eines berechneten Reflexes [8].

Indem die beiden Scheiben luftdicht miteinander verbunden werden und auf diese Weise einen mit einem Gas, meist trockene Luft, gefüllten Raum umschließen, stellen sie ein geschlossenes thermodynamisches System dar, dessen Temperatur und Druck bei gleich bleibender Gasmenge aufgrund sich ändernder äußerer Bedingungen schwanken können. Wenn der Innendruck kleiner oder größer als der Außendruck ist, wölben sich die Scheiben nach innen oder nach außen. Damit ändern sich die

Abb. 31: Die Deformationen der gespiegelten Fenster verraten die Deformation der spiegelnden Doppelscheibe.

optischen Eigenschaften. Bezogen auf die spiegelnde Reflexion wird die eine der Scheiben zu einem Hohl- die andere zum Wölbspiegel.

Das macht sich einerseits dadurch bemerkbar, dass direktes Sonnenlicht z.B. auf einer gegenüberliegenden Häuserwand zu einem charakteristischen Lichtfleck fokussiert werden kann [8]. Außerdem zeigen die spiegelnden Reflexe in Doppelscheiben charakteristische Verdopplungen und Verzerrungen, die nicht nur physikalisch interessant sind, indem Sie Rückschlüsse auf den Zustand der Doppelscheibe erlauben, sondern auch einen besonderen ästhetischen Reiz ausüben.

In Abb. 31 werden in einem Fenster sinnigerweise Fenster der gegenüberliegenden Häuserwand gespiegelt. Man erkennt zum einen, dass die Fenster in jeder einzelnen der beiden Scheiben gespiegelt wird. Da die Bilder von unterschiedlicher Größe sind, muss man davon ausgehen, dass die eine der beiden Scheiben wie ein Wölbspiegel (welche?), die andere wie ein Hohlspiegel wirkt. Letztere verhält sich offenbar wie ein überdimensionaler Kosmetikspiegel, bei dem das gespiegelte Objekt innerhalb der einfachen Brennweite gelegen ist. Die Brennweite der Scheiben muss also mindestens so groß sein wie der Abstand der sich gegenüberliegenden Fenster.

Diese Folgerung steht in guter Übereinstimmung mit der Beobachtung, dass die an die gegenüberliegende Häuserwand geworfenen Reflexe der Sonne nicht selten im Brennpunkt der hohlspiegelartig verformten Scheibe liegen.

Außerdem erkennt man an den charakteristischen Krümmungen der Spiegelungen der geradlinigen Fensterrahmen, dass die Krümmungen an beiden Scheiben entgegengesetzt zueinander orientiert und an den Rändern ausgeprägter sind als in der Mitte. Die auf diese Weise erkennbare Form der Doppelscheibe stimmt ebenfalls mit der aus den Reflexen zu ermittelnden Form überein (vgl. [8]).

Abb. 32: Künstlerisch wirkende Muster von Reflexionen einer gleichartigen gegenüberliegenden Fensterfront.

Interessant ist, dass die vergrößernde Spiegelung die dunklere Farbe der Fensterscheiben nur noch unvollkommen erkennen lässt. Ursache dafür ist, dass durch das verkleinerte Spiegelbild der nach außen gewölbten Scheibe noch ein Teil der rötlichen Wand an die Stelle reflektiert wird, auf die die nach innen gewölbte Scheibe gerade das gegenüberliegende Fenster spiegelt. Es kommt zu einer Überlagerung, wobei die hellere rötliche Farbe dominiert.

Haben wir es in Abb. 31 bereits mit Fensterspiegelungen von Fenstern zu tun, so verdichten sich die Spiegelungen ganzer geometrisch angeordneter Fensterfronten in Abb. 32 zu einem auf den ersten Blick nicht zu durchschauenden ästhetisch ansprechenden Reflexionsmuster. Es kommt dadurch zustande, dass den in einem quadratischen Gitter angeordneten Fenstern eine gleichartige, vom hellen Sonnenlicht erleuchtete Fensterfront gegenüber liegt. Aufgrund der Deformationen der Doppelfenster der Spiegelbilder kommt es wie oben diskutiert zu den charakteristischen Verformungen der gespiegelten Elemente, die ihre Wirkung vor allem aus der einfachen quadratischen Form und der Vielzahl der Spiegelbilder ähnlich verformten Spiegelbilder beziehen. Die Betonung liegt auf „ähnlich“. Schaut man genauer hin, so erkennt man dass der Reiz gerade in den zahlreichen Variationen eines Grundmusters besteht. Diese Variationen lassen auf individuelle Unterschiede bei der Fertigung der Doppelscheiben schließen. Die große Ähnlichkeit in Gruppen benachbarter Scheiben deutet zudem darauf hin, dass diese Scheiben jeweils aus derselben Produktion stammen und unter gleichen Bedingungen entstanden sind.

4. Zusammenfassung

Die Alltagswelt wird normalerweise fraglos akzeptiert. Wie eine vertraute Tapete, von der wir unvorbereitet vermutlich nicht im Detail angeben könnten, wie sie aussieht, erleben wir den größten Teil der uns umgebenden Welt auf eine mehr oder weniger „implizite“ Weise: Wir sehen in dem Sinne, dass unsere Netzhäute von den optischen Eindrücken der betrachteten Gegenstände belichtet werden. Solange aber keiner hinten ihnen steht und das Gesehene als das und das interpretiert, bleibt das Gesehene unbewusst und trägt nicht zur Vermehrung der Erkenntnis bei. Erst wenn es gelingt, die Welt aus einer unvertrauten, im vorliegenden Fall physikalischen Perspektive wahrzunehmen, kann selbst Altbekanntes zu einer neuen Realität werden.

Wir haben versucht, einen solchen Perspektivwechsel anhand einiger ausgewählter Beispiele, bei denen die diffuse und spiegelnde Reflexion von Licht im Spiel ist, zu demonstrieren.

Dabei sollte u.a. folgendes gezeigt werden: Obwohl die spiegelnde Reflexion oft Teile des Objekts durch die Abbilder der gespiegelten Objekte verdeckt, wird die Wahrnehmung (Form, Glanz bei durchsichtigen Objekten) verbessert. Denn man „übersieht“ die Reflexe als Abbilder oft selbst dann, wenn sie optisch dominieren. Es wird meist nicht bewusst, dass das was als Glanz erscheint, mehr oder weniger deutliche Spiegelungen der hellen Umgebung sind.

Man gelangt in der Regel nicht von selbst in die physikalische Perspektive, in der ein glänzendes Objekt als Spiegel erscheint. Durch eine Schulung des „physikalischen Blicks“, in vorliegenden Fall für optische Phänomene wird es möglich, dem Alltäglichen neue, oft unerwartet interessante Erfahrungen abzugewinnen.

Dabei muss es sich nicht nur um physikalische Erfahrungen handeln. Der physikalisch intensivierte Blick vermag eine ästhetische, vielleicht sogar künstlerische Dimension des Alltäglichen zu eröffnen und damit den Alltag zu bereichern.

So kann auf affektiv positiv gestimmte Weise eine Verknüpfung zwischen der Schulphysik und dem Alltag hergestellt werden. Dies ist lerntheoretische von großer Bedeutung, weil eine Beschränkung der Physik auf Gegenstände und Phänomene, die nur im Physikunterricht vorkommen und keine Möglichkeit der Wiederbegegnung im Alltag ermöglichen, fast zwangsläufig zum Vergessen des Gelernten führen. Denn mit typischerweise zwei Stunden Physik in der Woche kommt man gegen die Erfahrungen in der übrigen Zeit kaum an.

Die implizit angesprochene Vorgehensweise, die komplexen Alltagsphänomene als Ausgangspunkt für eine physikalische Auseinandersetzung zu wählen, wird als Alternative zum weit verbreiteten „Lernen auf Vorrat“ angesehen.

An einigen Beispielen der optischen Reflexion im Alltag sollte insgesamt deutlich werden, dass uns Physik nicht nur zeigt, was wir noch nicht kennen, sondern auch das, was wir kennen, wie wir es noch nicht kennen.

Literatur

[1] Schlichting, H. Joachim: Physik - eine Perspektive der Realität. Probleme des Physikunterrichts (Teil 1 u. 2). Physik in der Schule 34/9,283- 288 und 34/10, 339- 342 (1996).

[2] Redeker, Bruno: Zur Sache des Lernens. Am Beispiel des Physiklernens. - Westermann. Braunschweig, 1982.

[3] Schlichting, H. Joachim: Sonnentaler fallen nicht vom Himmel. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 48/4, 199 - 207 (1995).

[4] Wagenschein, Martin: Verstehen lehren, Genetisch-Sokratisch-Exemplarisch. Beltz, Weinheim 1973, p.15.

[5] Leon Poon, José Campos, Edward Ott[4], and Celso Grebogi: Wada Basin Boundaries in Chaotic Scattering. Int. J. Bifurcation and Chaos 6, 251-266 (1996).

[6] Schlichting, H. Joachim: Das Schwert der Sonne-Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens. I. Lichtbahnen auf dem Wasser und II. Lichtbahnen in alltäglichen Situationen. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 51/7 (1998), S. 387- 397 und 52/6 (1999), S. 330- 336.

[7] Schlichting, H. Joachim: Glänzende Ansichten feuchter Kieselsteine. Erschienen in: Physik in unserer Zeit 36/1 (2005) S. 47.

[8] Schlichting, H. Joachim: Fenster im Lichte der Sonne. Experimente und Simulationen. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 57/8 (2004) 467-474.

Bildnachweis

Abb. 4 und Abb. 5:
http://www.susannealbers.de/08architektur-berlin04.html (30.10.05)
Abb. 9 und Abb. 10:
http://www.nationalgallery.org.uk/cgi-bin/WebObjects.dll/CollectionPublisher.woa/wa/largeImage?workNumber=NG2552&collectionPublisherSection=work
Abb. 17:
Hilde Köster, Institut für Didaktik der Physik Universität Münster.
Alle übrigen Abbildungen stammen vom Verfasser.