

Schatten, Spiegel geometrische Optik, exemplarisch vertieft

Ueli Aeschlimann, Prof. em. Dr. Dr.¹

Wagenscheintagung 2023

In meiner Präsentation geht es um exemplarischen Unterricht. Im berühmten Tübinger Gespräch² von 1951 haben namhafte Persönlichkeiten - darunter auch Martin Wagenschein, kritisiert, dass Unterricht zu sehr auf umfangreiche, unverdaute Stoffvermittlung ziele. Sie forderten, dass ausgewählte Themen sorgfältig und gründlich erarbeitet werden sollen. Ich möchte am Beispiel der Themen Schatten und Spiegel zeigen, was exemplarisch unterrichten für mich bedeutet. Wir werden in einem ersten, ausführlicheren Teil zunächst inhaltlich arbeiten und die beiden Themen beleuchten, soweit das in einer kurzen Präsentation möglich ist. Anschliessend werde ich dann auf die Metaebene wechseln und an unserem konkreten Beispiel den exemplarischen Unterricht analysieren.

Die Themen Spiegel und Schatten gehören zur geometrischen Optik. Ich werde nicht fragen, ob Licht nun als Teilchen oder als Wellen dargestellt wird, und welche Experimente dabei wichtig sind, etwa die Beugung oder der Photoeffekt. Es geht in der geometrischen Optik nur um das Verhalten eines Lichtstrahls. Es geht auch nicht darum, dass ein Strahl – im mathematischen Sinn – eine Abstraktion darstellt, sondern ein Strahl kann mit folgender Anordnung erzeugt werden: Wir nehmen eine Lampe, deren Licht einen Kegel bildet. Mit einer Linse erzeugen wir ein paralleles Lichtbündel, das wir durch eine Blende einengen. Wenn ich einer Taschenlampe eine Kappe aufsetze, aus schwarzem Papier, mit einem schmalen Schlitz, kann ich leicht ein solches Lichtbündel herstellen (vgl. auch Bild auf Seite 4).



Mit Lasern gelingt das heute noch viel besser. Mit Staub oder feinen Wassertröpfchen in der Luft kann man den Verlauf des Lichtstrahls sichtbar machen.

Es gibt einen sehr schönen Text von Wagenschein, der zum Schluss kommt: „*So also ist das Licht: An sich selber ist es nicht zu sehen, nur an den Dingen [den Staubkörnchen, oder den Wassertröpfchen, U.A.]; und auch die Dinge sind aus sich selber nicht zu sehen, sondern nur im Licht.*“³

¹ Ueli Aeschlimann unterrichtete nach seinem Physikstudium an der Universität Bern Physik, Chemie und Astronomie am Lehrerseminar. Von 2001-2017 war er Dozent für die Fachausbildung und die Fachdidaktik der Physik an der PH Bern. Nach seiner Emeritierung arbeitete er noch zwei Jahre an der PH Luzern. Heute unterrichtet er ein Teilpensum Mathematik und Naturwissenschaft für hochbegabte Kinder der 5. bis 8. Klasse in Münchenbuchsee.

² M. Wagenschein: Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken, Band 1, S. 204-208

³ M. Wagenschein: Das Licht und die Dinge. In: Naturphänomene sehen und verstehen, S.113

Im Bild sieht man, wie das Licht durch Wassertröpfchen in der Luft sichtbar wird. In Physikbüchern kann man lesen, dass die von der Sonne kommenden Lichtstrahlen parallel sind. Stimmt das? Das Bild könnte einen daran zweifeln lassen. Aber wenn ich Ihnen ein Bild von Eisenbahnschienen zeigen, die hoffentlich schön parallel verlegt sind, optisch aber zusammenlaufen, sieht man, dass das Bild aus dem Wald auf Perspektive zurückzuführen ist.



Im schweizerischen Lehrplan 21 heisst es: *Schülerinnen und Schüler können Phänomene zu Licht und Schatten angeleitet untersuchen*. Kinder erforschen den Schatten, sie erkennen, dass der Schatten an das Kind gebunden ist, man kann dem Schatten nicht davonspringen, dass der Schatten mit der Sonne zu tun hat, und im Laufe des Tages wandert. Wir nehmen die Fragen und Ideen der Kinder ernst. Wagenschein schreibt: *Lassen wir die Kinder nachdenken und ausreden. ... Hören wir zuerst nie auf das, was einer sagt, sondern lauschen wir auf das, was er meint. ... Haben die Kinder Vertrauen gewonnen, so sagen sie oft Erstaunliches.*⁴ und weiter: *Der Lehrer hat vor allem hartnäckig darüber zu wachen, dass wirklich verstanden wird, von Allen. Er wird also nicht drängen und eilen müssen. ... Er wird sich freuen, wenn jemand widerspricht.*⁵

Wagenschein berichtet von einem siebenjährigen Knaben, der den Zusammenhang zwischen dem Licht der Sonne und dem Schatten entdeckte und sagte: *„Die Sonne geht durch einen durch – und hinten kommt sie als Schatten wieder heraus. Und wenn keine Sonne da ist, gibt es ja auch keinen Schatten“.*⁶ Peter Buck und ich sind und nicht einig, wie man mit einer solchen Erklärung umgehen soll⁷, aber darauf will ich jetzt nicht eingehen. Wichtig ist, dass Kinder selber Erfahrungen machen können, dass sie Fragen stellen, dass sie Ideen entwickeln. Ältere Kinder werden leicht einsehen, dass Schatten für den Physiker einfach das Fehlen von Licht ist. Aber so einfach ist das nun auch wieder nicht. Was passiert, wenn wir das Licht einer Lampe löschen? Im Schattenbereich ändert sich nichts, sondern in der Umgebung! Lydia Murmann weist daher darauf hin, dass eigentlich nicht der Schatten, sondern die beleuchtete Umgebung das Phänomen ist.

Betrachten Sie das nächste Bild: Wir sehen den Schatten der Person am Boden, aber ist der Schatten zweidimensional? Und sind die Wände des Korridors durch den Schatten schwarz? Schatten von was? Wir glauben, Schatten wäre eine klare Sache, aber wenn man genau hinschaut, tauchen plötzlich Fragen auf.



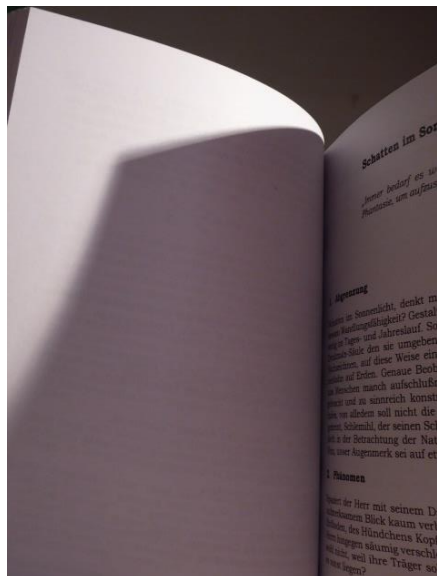
⁴ M. Wagenschein: Natur physikalisch gesehen, S.17/18

⁵ M. Wagenschein: Sprache zwischen Natur und Naturwissenschaft, S.81

⁶ M. Wagenschein: Kinder auf dem Weg zur Physik, S.62

⁷ U. Aeschlimann/P.Buck: Verfrühungen – über die rechte Zeit des Umgangs mit Phänomenen. In: Tagungsband zur GDGP-Tagung in Dresden, 2009

In einem Text von Christoph Raebiger habe ich folgende Beschreibung gefunden: *Spaziert der Herr mit seinem Dackel im Sonnenschein, so bleibt aufmerksamem Blick kaum verborgen, dass, als Schatten auf dem Erdboden, des Hündchens Kopf ausgesprochen scharf, der seines Herrn hingegen säumig erscheint.*⁸ Als ich diesen Text gelesen habe, ist mir aufgefallen, dass das gleiche Phänomen auch beim Buch



beobachtet werden kann: In der Mitte ist der Schatten scharf, gegen aussen wird er zunehmend unscharf. Woher kommt das? Es kommt daher, dass die Sonne und die Lampe keine exakt punktförmigen Lichtquellen sind. Man kann mit zwei Kerzen leicht zeigen:



Es gibt Bereiche, wo kein Licht hinkommt, dort spricht man vom Kernschatten. Dann gibt es Bereiche, wo nur das Licht einer Lichtquelle hinkommt, das ist der Halbschatten Und ausserhalb ist der von beiden Lampen beleuchtete Bereich.

Wenn ich nun nicht zwei punktförmige Lichtquellen verwende, sondern eine ausgedehnte Lichtquelle (die Glühbirne beim Buch, oder die Sonne beim Dackel und seinem Herrn), dann gibt es nicht einen einzigen Halbschatten, sondern einen Übergang von dunkel zu hell. Diese Zone erzeugt die Unschärfe des Schattens beim Buch. Zur Illustration habe ich ein Stück Holz mit einer Leuchtstoffröhre beleuchtet, die ich im Versuch links senkrecht und im Versuch rechts waagrecht gehalten habe. Man kann deutlich sehen, dass wir im linken Bild einen klar begrenzten Schatten haben, während rechts der Schatten gegen aussen immer schwächer wird.



⁸ C. Raebiger: Über die Kunst des Lehrens, S. 65

Das Phänomen von Kern- und Halbschatten wird in vielen Büchern am Beispiel einer totalen Sonnenfinsternis veranschaulicht. Aber das Bild ist meistens falsch gezeichnet: schwarzer Kernschatten, grauer Halbschatten und helle Umgebung. In Wirklichkeit geht der Halbschatten kontinuierlich von dunkel zu hell über. Je näher man bei einer totalen Sonnenfinsternis an den Kernschatten herankommt, desto dunkler wird es. Interessant ist, dass der letzte Moment von sehr dunkel zu ganz dunkel überraschend drastisch ist, ich konnte das 1999 bei einer Sonnenfinsternis in Süddeutschland selber erleben.

Das nächste Bild führt uns zum zweiten Thema, das ich in diesem Vortrag ansprechen möchte: Der Spiegel. Das Loire-Schloss wird im Wasser wunderbar gespiegelt. Voraussetzung ist natürlich eine vollkommen ruhige Wasseroberfläche



Spiegel werden hergestellt, indem auf die Rückseite einer Glasscheibe eine dünne Schicht aus Silber (oder Aluminium) aufgedampft wird und diese Schicht wird dann mit einer Lackschicht geschützt. Im Bild sehen Sie zwei gegeneinander gestellte Spiegel. Im vorderen Spiegel habe ich die Lackschicht in der Mitte weggekratzt, um ein kleines Loch zu erhalten. Wenn ich durch das Loch schaue, sehe ich nicht nur die Kerzenflamme, sondern auch ihr Spiegelbild des hinteren Spiegels, das

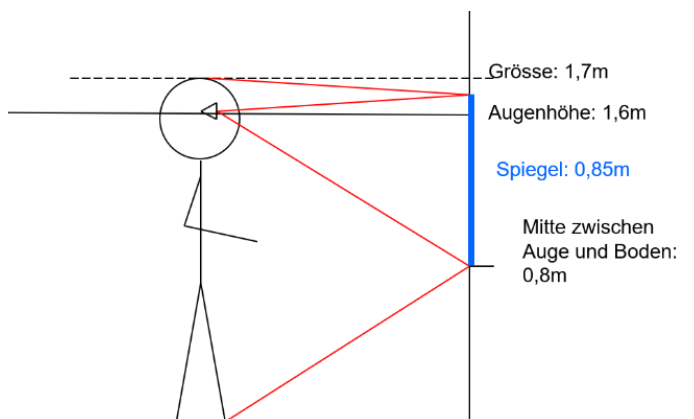
seinerseits vom vorderen Spiegel auch wieder ein Spiegelbild erzeugt, das sich im hinteren Spiegel wieder spiegelt. So entsteht eine lange Reihe von Flammen. Man blickt gewissermassen in die Unendlichkeit, sehr eindrücklich!

In den Physikbüchern findet man zum Thema „Spiegel“ meist nur die Beschreibung des Abbildungsgesetzes: „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“ abgehakt. Schülerinnen und Schüler können dieses Gesetz mit einem einfachen Experiment selber entdecken.

Zum Teil wird dann in den Physikbüchern noch die Entstehung des virtuellen Bildes beschrieben, das im gleichen Abstand hinter dem Spiegel zu stehen scheint, aber hat man damit den Spiegel schon abgehakt? Anhand einiger ausgewählter Beispiele möchte ich Ihnen zeigen, wie viele Fragen noch auftauchen können.



1) Die erste Aufgabe ist ein Klassiker:⁹ Ein Mensch steht 1 m vor einem an der Wand aufgehängten Spiegel. Wie gross muss ein Spiegel sein, damit man sich ganz darin sehen kann? In welcher Höhe muss er aufgehängt werden? Spielt der Abstand vom Spiegel eine Rolle?



Das Bild zeigt die Konstruktion mit Hilfe der Lichtstrahlen. Man kann die Grösse und Lage des Spiegels aber auch elegant so lösen: wir zeichnen hinter dem Spiegel im gleichen Abstand das Spiegelbild der Person und verbinden das Auge mit dem Fuss, bzw. dem Scheitel des virtuellen Spiegelbildes.

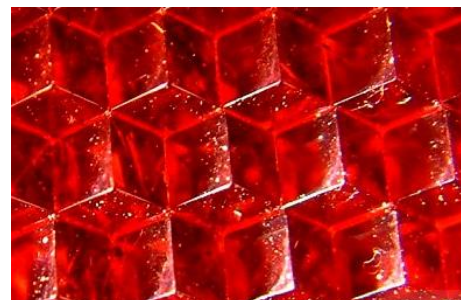
Spannend ist, dass der Abstand keine Rolle spielt. Mit der Konstruktion lässt sich das leicht zeigen, aber es widerspricht vollkommen unserem Gefühl. Man muss es selber erleben, um überzeugt zu sein. Stehen Sie 1m vor einem an der Wand aufgehängten Spiegel. Wie weit können Sie ihren Körper sehen? Bis zum Gürtel? Oder bis zum Knie? Entfernen Sie sich nun langsam vom Spiegel, und sie werden sehen, dass Sie immer gleich viel von ihrem Körper sehen!

2) Eine Kerze spiegelt sich am Abend, wenn es draussen dunkel ist, in einer Fensterscheibe. Ist Ihnen auch schon aufgefallen, dass die Flamme doppelt erscheint? Manchmal sogar mehrfach? Kann man das verstehen? Die Erklärung lautet: Wir sehen zwei nahe beieinanderstehende Flammen, weil das Licht der Kerze sowohl an der Vorderseite des Glases als auch an der Rückseite gespiegelt wird. Wenn wir ein Fenster mit Doppelverglasung haben, kann man sogar zwei solcher „Doppelflammen“ sehen, von der inneren und in einem Abstand eine von der äusseren Scheibe.

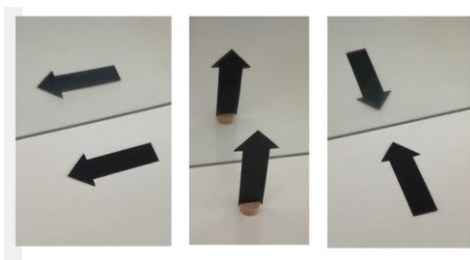


⁹ z.B. L. Epstein: Denksport Physik, S. 403

3) Als nächstes konstruieren wir den Verlauf eines Lichtstrahls, der an zwei senkrecht zueinander stehenden Spiegeln gespiegelt wird. Wir sehen aus der Konstruktion, dass der Lichtstrahl parallel zum einfallenden Strahl zurückkommt. Auch bei anderen Winkeln? Ja, und man kann das geometrisch leicht beweisen. Eine wichtige Anwendung ist der Rückstrahler beim Fahrrad, der aus lauter kleinen, dreidimensional senkrecht zueinanderstehenden Flächen besteht. Damit wird nicht nur Licht, das geraden von hinten kommt, sondern auch Licht, das leicht schräg auf den Rückstrahler auftrifft, in Richtung der Lichtquelle zurückgeworfen. Das vergrößerte Bild zeigt einen Ausschnitt eines Rückstrahlers. Die Kantenlänge einer Spiegelfläche ist ca 2mm lang.



4) Wir kommen nun noch zu einem ganz schwierigen Aspekt des Spiegels. Sie sehen eine Bahnhofsfuhr und ihr Spiegelbild. Warum vertauscht der Spiegel links und rechts, aber nicht oben und unten? Hat das damit zu tun, dass unsere Augen waagrecht angeordnet sind? Nein, denn wenn wir uns quer hinlegen, ändert sich nichts. Was ist da los? Ein einfaches Experiment hilft uns einen Schritt weiter: Wir betrachten das Spiegelbild eines aus Karton ausgeschnittenen Pfeils. Der Pfeil zeigt nach links, und auch das Spiegelbild zeigt nach links. Der Pfeil zeigt nach oben, und auch das Spiegelbild des Pfeils zeigt nach oben. Aber wenn der Pfeil auf den Spiegel hin zeigt, dann zeigt das Spiegelbild gegen uns. Der Spiegel vertauscht also hinten und vorne. Wenn wir statt dem Pfeil einen Buchstaben, z.B. ein L verwenden, sehen wir: der Fuss des L zeigt auch im Spiegel nach rechts, wir können den Buchstaben im Spiegel korrekt lesen, aber er hat eine andere Farbe, weil wir die Rückseite sehen. Wenn wir die Rückseite direkt, ohne Spiegel, sehen wollen, müssen wir von der anderen Seite schauen und uns dabei umdrehen. Bei dieser Umdrehung vertauschen sich links und rechts, und daher können wir den Buchstaben nun nicht mehr lesen.



Links bleibt links,
oben bleibt oben,
vorne und hinten wird vertauscht



Das ist ziemlich anspruchsvoll, und ich zeige Ihnen daher noch ein weiteres Bild: die Playmobilfigur. Wir als Betrachter, sehen die Rückseite der Person, während im Spiegel die Vorderseite sichtbar ist. Die Person hält ihren Stift in der rechten Hand, und auch im Bild ist der Stift rechts. Wir sehen, dass die reelle Person eine Rechtshänderin ist, aber das Spiegelbild ist eine Linkshänderin. Auch der Buchstabe

auf der Brust der Person ist seitenverkehrt. Wenn wir den Buchstaben richtig lesen wollen, müssen wir die reelle Person von vorne betrachten, und dazu müssen wir uns um 180° drehen. Diese Drehung macht das Spiegelbild nicht, und darum ist es seitenverkehrt.

5) Im Rahmen meines Mathematikunterrichts für hochbegabte Kinder habe ich in letzter Zeit viele Känguru-Aufgaben gelöst. Eine davon lautet¹⁰:

Valerie hat ein T-Shirt gewonnen, auf dem das Wort KANGOUROU steht. Sie zieht es an und bewundert sich dann im Spiegel. Was sieht sie:

- A) KANGOUROU
- B) UORUOGNAK
- C) UORUOGNAK
- D) NORUOGNAK
- E) KANGOURU

Aus dem, was wir vorhin besprochen haben, sollte die Lösung leicht möglich sein: Der Schriftzug auf dem T-Shirt geht von rechts nach links, denn die Schrift soll ja für eine Person, die das T-Shirt betrachtet, lesbar sein. K muss also rechts stehen, (A) und (D) scheiden aus. Oben und unten werden nicht vertauscht, damit scheidet (E) aus. Die Buchstaben müssen spiegelverkehrt sein (sonst sind sie für eine vis-a-vis stehende Person nicht lesbar, damit scheidet (B) aus und die richtige Lösung ist (C).

6) Im Bild sehen sie, wie ich eine Hand vor dem Spiegel auf den Tisch lege, die andere Hand hinter dem Spiegel. Wenn ich in den Spiegel blicke, sehe ich natürlich nicht meine rechte Hand, sondern das Spiegelbild der linken Hand. Beachten Sie, dass das Spiegelbild der linken Hand eine rechte Hand ist. In der Geometrie heisst das: Ein Dreieck kann mit seinem Spiegelbild durch Drehen und Verschieben nicht zur Deckung gebracht werden, man muss es umklappen. Obwohl die beiden Dreiecke kongruent sind - denn alle Seitenlängen und Winkel stimmen überein - sind sie nicht deckungsgleich. In der Chemie gibt es Moleküle, in denen die Atome spiegelbildlich angeordnet sind. Man spricht von chiralen Molekülen, die trotz gleichem Aufbau nicht die exakt gleichen chemischen Eigenschaften haben.

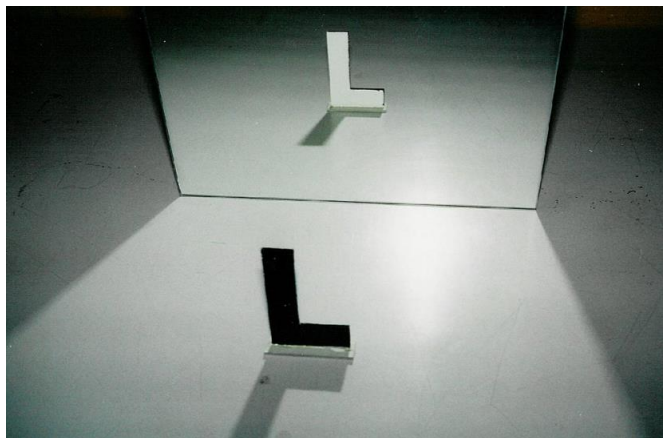


Spannend in unserem Experiment ist nun: wenn ich die rechte Hand bewege, passiert im Spiegel nichts passiert, Sie müssen das unbedingt selber machen, es ist

¹⁰ Känguru 7/8, 1999, Nr. 3 https://www.mathe-kaenguru.de/chronik/aufgaben/downloads/98_78.pdf

ein ganz eigenartiges Gefühl, wenn man die Hand bewegt und keine Bewegung sieht.¹¹

7) Als Abschluss des inhaltlichen Teils zeige ich Ihnen folgendes Bild.



Irgendwie merkwürdig, oder? Die Schatten scheinen nicht zu stimmen, aber ich versichere Ihnen, dass das eine reelle Fotografie ist, kein fake. Die Lösung siegt folgendermassen aus: Die Lichtquelle ist so positioniert, dass der Schatten des L genau hinter dem L liegt und damit nicht zu sehen ist. Wir sehen daher nur den Schatten, der gegen uns zeigt und durch das im Spiegel gespiegelte Licht entsteht. Im Spiegelbild ist der direkte Schatten aber zu sehen und zeigt natürlich Richtung Spiegel.

Mit den bisher präsentierten und besprochenen Situationen wollte ich Ihnen zeigen, wie interessant die Themen «Schatten» und «Spiegel» sein können. Es steckt viel mehr dahinter als nur „Schatten ist dort, wo kein Licht hinkommt“ und „Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel“. Es gibt viele anspruchsvolle Situationen, die zum Denken anregen, und erst das sorgfältige Studium solcher Situationen führt zum „wirklichen Verstehen“, das Wagenschein anstrebt. Sie haben vielleicht bemerkt, dass all die Versuche, die ich Ihnen vorgestellt habe, mit ganz einfachem Material durchgeführt werden können. Physik nicht als Laborwissenschaft, mit komplizierten Geräten, sondern mit einem direkten Bezug zum Alltag.

Wagenschein warnt zu Recht: *Man kann richtige Worte gebrauchen und richtige Zusammenhänge richtig sagen ohne zu wissen, was eigentlich los ist.*¹² Wenn man einen Zusammenhang verstehen will, muss man erleben, wie man darauf kommt, in Wagenscheins Worten: *Ein naturwissenschaftliches Ergebnis kann gar nicht verstanden werden ohne Kenntnis des Weges, der zu ihm führte.*¹³

Verstehen gibt es nicht umsonst, sondern nur durch intensive Auseinandersetzung mit der Sache. Hentig schreibt: *Verstehen ist eine wichtige Fähigkeit. Man kann sich in ihr üben; und manches versteht man am Ende des Lernvorgangs auch. Noch*

¹¹ U. Aeschlimann: Werkstattunterricht zum Thema „Spiegel“. In: Naturwissenschaften im Unterricht, Physik. Heft 37 (1997), S.15ff.

¹² M. Wagenschein: Naturphänomene sehen und verstehen, S. 27

¹³ M. Wagenschein: Die Pädagogische Dimension der Physik, S. 9

*wichtiger will mir scheinen, dass man erfahren hat, was Verstehen ist: wie schwierig und doch möglich, wie notwendig und immer neu.*¹⁴

Die Schülerinnen und Schüler müssen das an ausgewählten Stellen selber erleben. *Keine Lehrperson kann einem Lernenden das Verstehen abnehmen; sie kann allenfalls eine gute Inszenierung bereitstellen, die dazu auffordert, den Sprung vom lebensweltlichen Erlebnis zum abstrakten, mathematisierten und modellhaften Lernergebnis zu wagen und zu vollziehen.*¹⁵ Die Brücke vom Phänomen (einem Spiegelbild) und seiner abstrakten Erklärung (mit den Lichtstrahlen) darf im Lernprozess nicht abgebrochen werden. Wir müssen den Weg auch rückwärts wieder gehen können: Die von uns erkannte Gesetzmässigkeit macht Aussagen (wie gross muss ein Spiegel sein), die wir mit Beobachtungen wieder überprüfen können.

Exemplarisch heisst nicht: irgend ein Beispiel, sondern eines das inhaltlich relevant ist und das ausstrahlt auf andere Themen. Statt Formeln auswendig zu lernen erkennen wir, wie Physik entsteht, wie wir vom Phänomen zur Erklärung kommen, wie Modelle und Formeln hilfreich sein können, und wie man die Erkenntnisse in neuen Situationen verwenden kann. Exemplarische Vertiefungen *kosten Zeit. Aber sie sind nicht zeit-raubend, sondern zeit-lohnend.*¹⁶ Und Wagenschein schreibt weiter: *Nicht alle Stunden können oder sollen so sein. Gerade dann (und nur dann), wenn sie ab und zu gelingen, ist es möglich und nötig, dazwischen streckenweise auch einmal schnell und berichtend vorzugehen.*¹⁷ Wagenschein beschreibt das mit dem Bild einer Brücke, die auf sorgfältig gebauten, stabilen Pfeilern ruht, zwischen denen die Brücke gespannt wird.¹⁸ Exemplarisch ist daher nicht „Mut zur Lücke“, sondern „Mut zur Gründlichkeit“. Exemplarisch ist die notwendige Voraussetzung, wenn wir Verstehen zum Ziel haben, statt Examenswissen anzuhäufen, das rasch wieder vergessen wird. Rumpf formuliert eindrücklich: *Im Unterricht muss man eine Sache vor sich bringen, nicht hinter sich.*

Mein Vortrag hat zum Ziel, Ihnen am Beispiel von Schatten und Spiegel zu zeigen, wie interessant und herausfordernd Unterricht sein kann, wenn man sich intensiv auf eine Sache einlässt. Man muss selber erleben, wie anstrengend Verstehen ist, und wie erfüllend das schliessliche Aha-Erlebnis ist - und dann will man immer wieder verstehen!

Literatur:

M. Wagenschein: Die Sprache zwischen Natur und Naturwissenschaft. (Jonas, 1986)
Wagenscheins letzter Vortrag, in welchen er seine Anliegen mit konkreten Beispielen verdeutlicht.

P. Buck / U. Aeschlimann: Vertiefung und Ausstrahlung. (Kooperative Dürnau, 2022)
Wir beschreiben, wie wir das Exemplarische bei Wagenschein verstehen und umsetzen.

¹⁴ H. v. Hentig: Bildung, S.198

¹⁵ P. Buck / U. Aeschlimann: Vertiefung und Ausstrahlung, S. 32

¹⁶ M. Wagenschein: Verstehen lehren, S.148

¹⁷ M. Wagenschein: Unterricht, Drill oder Erlebnis? in: Ursprüngliches Verstehen und Exaktes Denken, Band 1, S. 341

¹⁸ „Zwischen den gutgegründeten Brückenpfeilern leiten dann luftigere Bögen schneller fort.“
M. Wagenschein: Verstehen lehren, S. 31