

Sonnentaler fallen nicht vom Himmel

1 Das Phänomen

Das Phänomen der Sonntaler zieht sich wie ein roter Faden durch die Geschichte der Optik. Die Entstehung eines runden Abbildes hinter einer rechteckigen Öffnung stellte über Jahrtausende hinweg eine Herausforderung des physikalischen Denkens dar und führte in der Verteidigung der geradlinigen Ausbreitung des Lichtes in ein Labyrinth von - aus heutiger Sicht - merkwürdigen Erklärungen. Kepler diente dieser rote Faden als Ariadnefaden, der ihn aus dem Labyrinth herausführte. Die Geschichte der Sonntaler soll uns dazu dienen, auf Lernschwierigkeiten unserer Schülerinnen und Schüler aufmerksam zu machen, die im Bereich der üblicherweise als einfach angesehenen geometrischen Optik auftreten.

*O Sonne! Wenn du gleitest durch das Laub der hohen Linden,
Dann wirfst du helle Flecken auf den Grund,
So schön, daß ich nicht darauf zu treten wage.*

EDMOND ROSTAND

Den meisten Menschen, die an einem strahlenden Sonnentage unter dem Blätterdach von Bäumen spazieren gehen oder sich im Schatten eines Baumes ausruhen, entdecken normalerweise nichts Besonderes in den ineinander verwobenen Licht- und Schattenstrukturen, die den Boden und andere Gegenstände bedecken (Abb. 2).

Ein Phänomen wird daraus meist erst dann, wenn die Lichtquelle ihre Form ändert, wie bei der teilweise bedeckten Sonne während einer Sonnenfinsternis. Man erkennt halbmondförmige Lichtgebilde im Schattenbereich der Bäume und wird sich vielleicht über diesen Umweg der normalerweise zu sehenden Kreis- bzw. Ellipsenform bewußt.

Hat man diese Sonntaler¹ erst einmal gesehen, so sieht man sie immer wieder. Leider erlebt man Sonnenfinsternisse sehr selten, und wenn es dann tatsächlich einmal der Fall ist, befindet man sich wahrscheinlich nicht gerade unter Bäumen. Zwar lassen sich im Fall einer durch dicke Wolken teilweise verdeckten Sonne auch zu anderen Zeiten Halbmondstrukturen beobachten. Da dieses Phänomen aber meist von kurzer Dauer ist, wird es wohl auch nur von jemandem bemerkt, der auf eine solche Beobachtung vorbereitet ist. Deswegen kann man in der Regel zwar davon ausgehen, daß die Netzhäute eines jeden Menschen bereits von Sonntalern belichtet wurden, ohne daß sie "gesehen" worden wären. Solange nämlich hinter den Netzhäuten keiner "steht", dem die teilweise perfekt gerundeten Lichtflecken auffallen,

und der sich darüber wundert, bleiben sie zwangsläufig unter der Decke alltäglicher Selbstverständlichkeiten verborgen: Man übersieht häufig gerade das, was nicht zu übersehen ist.

Aber es genügt nicht, runde Lichtflecken aus dem ungeordneten Durcheinander von Licht und Schatten unter dem Blätterdach von Laubbäumen auszusondern. Sonntaler werden daraus erst dann, wenn man sich davon überzeugt, daß die Rundheit weder durch eine geheimnisvolle Tendenz des Lichts, scharfe Kanten abzurunden, noch durch zufällig entstandene runde Lücken zwischen den Zweigen und Blättern der Bäume entsteht², sondern das Ergebnis einer Lochkameraabbildung der Sonne durch beliebig geformte Öffnungen im Blätterdach darstellt. So gesehen fallen Sonntaler nicht vom Himmel. Man muß sie sich – wie andere Taler auch – erarbeiten³.

2 Sonntaler geometrisch betrachtet

Wo Materie ist, ist auch Geometrie

JOHANNES KEPLER

Sonnentaler waren wie andere Licht- und Schattenphänomene seit dem Altertum Gegenstand geometrischer Überlegungen (siehe unten). Sie widerstanden lange einer im heutigen Verständnis konsistenten physikalischen Beschreibung. Dazu war es notwendig, das schon früh unterstellte Prinzip einer geradlinigen Lichtausbreitung in Einklang zu bringen mit den beispielsweise hinter rechteckigen Öffnungen auftretenden gerundeten Abbildern.

Die Geradlinigkeit der Lichtausbreitung spielt in der geometrischen Optik eine ähnlich fundamentale Rolle wie die Trägheit in der Mechanik. Beide Prinzipien stellen als Idealgestalten der physikalischen Sehweise den invarianten Hintergrund (Vakuum bzw. homogenes Medium) dar, vor dem das reale Phänomen überhaupt erst als physikalisches Geschehen begriffen werden kann, indem Abweichungen z.B. als Wechselwirkung mit dem umgebenden Medium physikalisch konzeptualisiert werden.

Das Prinzip der Geradlinigkeit wird aber erst durch die Idealisierung des Lichts als Ensemble von Lichtstrahlen so prägnant, daß eine vollständig geometrische, und das heißt konkret, zeichnerische Umsetzung möglich wird. Dem Lichtstrahl kommt in der Optik eine analoge Bedeutung zu wie dem Massenpunkt in der Mechanik.

¹ Mit dem vermutlich von MARTIN WAGENSCHNIEDER stammenden Wort „Sonntaler“ wird das Phänomen genauer bezeichnet als durch die in der Literatur häufiger benutzten Begriffe wie „Sonnenflecken“ oder „Lichtflecken“ [13]. Außerdem sind „Sonnenflecken“ bereits für einen auf die Sonne stattfindenden Vorgang reserviert. Unterrichtsbezogene Darstellungen findet man in [14] und [15].

² Diese und ähnliche Argumente wurden von Schülerinnen und Schülern, aber auch von Studierenden vorgebracht, als sie anhand von Fotos auf Sonntaler aufmerksam gemacht wurden. Mit diesem typisch lebensweltlichen Erklärungsmuster greifen sie offenbar auf „Erfahrungen“ mit Phänomenen der Art zurück, die hier diskutiert werden.

³ Damit sei auf die für die Ausbildung der physikalischen Sehweise typischen konzeptuellen Bemühungen verwiesen [1].



Abb. 2: *Sonnentaler unter dem Blätterdach von Bäumen a) im Überblick, b) aus der Nähe*



Abb. 1: *Wie verstreute Bierdeckel „liegen“ die Sonntaler in einem Gartencafé.*

Dieser Konzeptualisierung entsprechend geht man davon aus, daß eine punktförmige Lichtquelle Strahlen radial in alle Richtungen aussendet. Die entscheidende Verallgemeinerung dieser Vorstellung auf ausgedehnte Lichtquellen besteht darin, die leuchtende Oberfläche als kontinuierliches Ensemble unendlich



Abb. 3: *Selbst die länglichen Öffnungen eines Strohmattdaches führen zu Ketten von Sonntalern.*

vieler Punktlichtquellen aufzufassen, deren Lichtstrahlen Kegel bilden, die mit ihren Spitzen in den Punkten der ausgedehnten Lichtquelle enden und als Grundfläche die beleuchteten Objekte besitzen. Dabei wird meist stillschweigend unterstellt, daß sich die Lichtkegel ohne gegenseitige Behinderung durchdringen bzw. überlagern⁴.



Abb. 4 Der Schattenbereich des abgebildeten Baumes zeigt, daß auch die Schatten kleiner Blätter abgerundet werden und zu „negativen“ Sonnentälern führen.



Abb. 5: Auf zahlreichen Gemälden insbesondere von Impressionisten sind Sonnentaler zu entdecken. Hier ein Ausschnitt aus „La Moulin de la Galette“ von Auguste Renoir.

Auf dieser geometrischen Grundlage läßt sich das Sonnentalerphänomen in aller Allgemeinheit physikalisch beschreiben. Dazu betrachten wir das Beispiel einer ausgedehnten dreieckigen Lichtquelle, dessen Licht durch ein kreisrundes Loch auf einen dahinter aufgestellten Schirm falle (Abb. 6). Es wird davon ausgegangen, dass jedes von den Punkten ausgehende, vom Loch begrenzte Lichtbündel auf dem Schirm ein eigenes Bild des Lochs entwirft. In der Überlagerung sämtlicher Bilder des Lochs entsteht ein hybrides

⁴ Die Unterstellung der ungestörten Superposition sich kreuzender Lichtstrahlen darf weder im historischen Kontext noch aus der lebensweltlichen Sicht der Schülerinnen und Schüler als so selbstverständlich angesehen werden, wie es uns aus physikalischer Sicht erscheint.

Gebilde, das der Form der Lichtquelle (des Loches) um so ähnlicher wird, je kleiner (größer) das Loch ist und/oder je weiter der Schirm vom Loch entfernt ist.

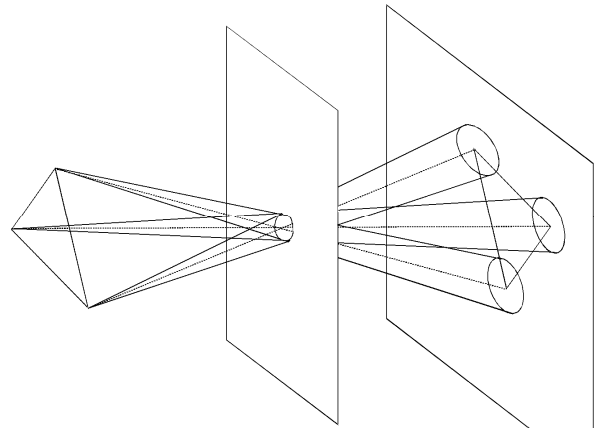


Abb. 6: Ein von einer flächenhaften Lichtquelle durchstrahltes Loch ruft hybride Abbildungen der Form des Loches und der Lichtquelle hervor, die um so mehr der Form der Lichtquelle ähneln, je kleiner das Loch ist.

Stellt man sich gemäß Abb. 6 einen Lichtpunkt vor, der den Rand der Lichtquelle abtastet, so "sieht" man vor seinem geistigen Auge, wie das zugehörige Lichtbündel ein Dreieck von Kreisen und damit ein mehr oder weniger stark aufgeblähtes Bild der Lichtquelle (bzw. des Loches) entwirft. Wer es etwas konkreter bevorzugt, kann sich auch einen Pinsel vorstellen, dessen Spitze der Form der Lichtquelle nachfährt und dessen Bürste infolgedessen ein grobes Bild der Lichtquelle auf den Schirm "malt" (Abb. 7).

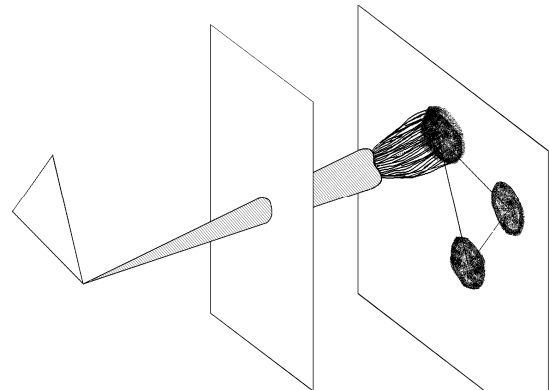


Abb. 7 Der „Lichtpinsel malt“ ein grobes Bild der Lichtquelle auf den Schirm.

Die in dieser Beschreibung vorkommende Vermischung konstruktiver Elemente mit realen Vorgängen ist insofern didaktisch bedenklich und damit diskussionswürdig, als dadurch suggeriert wird, die Konstruktion stelle nur bildlich dar oder imitiere, was tatsächlich ablaufe. Wie fragwürdig eine solche Einebnung der Differenz zwischen realem Phänomen und physikalischer Konzeptualisierung desselben ist, wird schon dadurch erkennbar, daß das Phänomen auch in ganz anderer Weise beschrieben werden kann. Geht man beispielsweise von der alternativen Vorstellung aus, daß an jedem Punkt des die Lichtquelle umgebenden Mediums Strahlen von jedem Punkt der Lichtquelle ankommen, so wird eine andere Visualisierung nahe-

gelegt: Man betrachtet unendlich viele Doppelkegel, deren Grundflächen durch die Lichtquelle und das Bild gebildet werden und die mit ihren Spitzen in der Ebene des Loches zusammentreffen. In Abb. 6 wird ein solcher Doppelkegel durch die gepunkteten mittleren Geraden dargestellt. Faßt man die durchgezogenen Geraden ebenfalls als Berandungen derartiger Doppelkegel auf, so gelangt man zu den Eckpunkten von Bilddreiecken, die jeweils um den Radius der aus dem Lichtbündelmodell hervorgegangenen Lichtflecken verschoben erscheinen.

Stellt man sich vor, daß in diesem Modell der Schnittpunkt der Geraden bzw. die Spitzen des Doppelkegels am Rand des Loches umlaufen, so kann man vor seinem geistigen Auge "sehen", wie die Bilddreiecke auf entsprechenden Kreisen umlaufen und dasselbe Dreieck von Kreisen hervorrufen, das vorher mit der Lichtbündelkonstruktion "gemalt" wurde.

Mit anderen Worten: Beide Modelle sind trotz einander ausschließender Vorstellungen äquivalent und stellen komplementäre Ansichten ein und derselben Sache dar. Interessanterweise kann man anhand der Geschichte der Optik feststellen, daß beide Vorstellungen Verwendung gefunden haben [3]. Wie man sich anhand der in Abb. 6 dargestellten Konstruktionen klar macht, kann man beide Ansichten wie bei anderen zweideutigen Bildern, etwa dem Neckerschen Würfel (Abb. 8), ineinander umklappen lassen⁵.

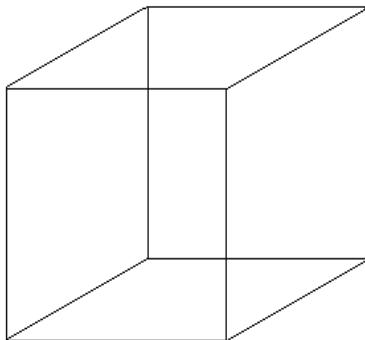


Abb. 8 Ein typisch zweideutiges Objekt, das bei längerer Betrachtung von einer Ansicht in die andere umklappt.

Die erstaunliche Reduktion der Komplexität des Sonnentalerphänomens im Rahmen einer geometrischen Konstruktion ist typisch für die physikalische Erfassung von komplexen Phänomenen. Das labyrinthartige Durcheinander von Konzepten und Beschreibungen, wie es sich im historischen Kontext offenbart, deutet jedoch an, wie wenig naheliegend und wie voraussetzungsvoll diese letztlich erst auf JOHANNES KEPLER (siehe jedoch Anm. 9) zurückgehende Konzeptualisierung tatsächlich ist: "Daß der Sonnenstrahl, der durch irgendeine Spalte dringt, in Form eines Kreises auf die gegenüberliegende Fläche auffällt, ist eine allen geläufige Tatsache. Dies erblickt man unter rissigen Dächern, in Kirchen mit durchlöchernten Fensterscheiben und ebenso unter jedem Baume. Von der

⁵ Eine Visualisierung des umlaufenden Lichtpunktes im Rahmen der beiden Modellvorstellungen ließe sich mit Hilfe einer entsprechenden Computeranimation realisieren.

wunderbaren Erscheinung dieser Sache angezogen, haben sich die Alten um die Erforschung der Ursachen Mühe gegeben. Aber ich habe bis heute noch keinen gefunden, der eine richtige Erklärung geliefert hätte" [5].

3 Sonntaler historisch gesehen

Alles Licht, welches durch ein eckiges Fenster einfällt, wird ABGERUNDET

WITELLO

Sonntaler spielen aus heutiger Sicht im Rahmen der historischen Genese der geometrischen Optik eine paradigmatische Rolle. Zum einen reduziert sich in ihnen das Phänomen der Bild durch Licht auf den denkbar einfachsten Fall der Lichtausbreitung in einem homogenen Medium, also ohne daß Brechungs- und Spiegelungsvorgänge ins Spiel kämen. Zum anderen sind Sonntaler notwendig mit ausgedehnten Lichtquellen verknüpft und gehen daher über den physikalisch trivialen Fall einer punktförmigen Lichtquelle hinaus. Die Klärung des Phänomens der Sonntaler kann daher aus historischer Perspektive als Prüfstein für die Grundannahmen der geometrischen Optik angesehen werden, insbesondere für die Hypothese, daß der Weg des Lichts längs gerader Linien verläuft. Die Diskussion der Sonntaler zieht sich wie ein roter Faden durch die zweitausend Jahre währen-



Abb. 9 Ältere Darstellung sichelförmiger Sonntaler, die bei einer Sonnenfinsternis durch das Blätterwerk eines Baumes hervorgerufen werden

den Bemühungen, eine allgemein akzeptierte Theorie hervorzubringen. Für KEPLER wird er schließlich zum Ariadefaden, der ihn aus dem Labyrinth herausführen sollte, in das die Optik aus seiner Sicht geraten war, und das sich in der Astronomie als handfeste Antinomie bei der Beobachtung von Sonnenfinsternissen manifestierte (siehe unten).

Auch wenn Sonntaler auf den ersten Blick im Vergleich zu den zahlreichen anderen Phänomenen der

geometrischen Optik eine untergeordnete Rolle zu spielen scheinen, forderten sie in ihrem offenbaren Widerspruch zur geometrischen Intuition die Optiker im Laufe der Geschichte immer wieder heraus, ihre theoretischen Konzepte an ihnen zu erproben. Bereits in der pseudo- aristotelischen Schrift *Problemata Physica* tritt das Phänomen der Sonntaler in einem optischen und astronomischen Zusammenhang auf. Der Autor fragt sich zum einen: "Warum erzeugt die Sonne, wenn sie durch viereckige Gebilde dringt, nicht rechteckig gebildete Formen sondern Kreise, wie z.B. wenn sie durch Flechtwerk dringt?", und zum anderen: "Warum treten bei Sonnenfinsternis, wenn man durch ein Sieb oder durch Blätter(lücken) sieht, etwa einer Platane oder eines anderen breitblättrigen Baumes (Abb. 9), oder wenn man die Finger der einen Hand mit denen der anderen verflechtet, die Sonnenstrahlen auf der Erde halbmondförmig in Erscheinung?" (Abb. 10) [3].



Abb. 10: Sichelförmige Sonntaler durch gekreuzte Finger hervorgerufen.

Bei der Beantwortung dieser Fragen ergibt sich für den Autor der *Problemata* ein ernsthaftes Problem. Wenn, wie unterstellt wird, das Licht der Sonne geraden Linien folgt, die im Bereich der kleinen Öffnungen nahezu parallel verlaufen, dann würde man den damaligen geometrischen Vorstellungen entsprechend rechteckige statt runde Lichtflecken erwarten. PSEUDO- ARISTOTELES hält aber letztlich an dem bei der Beschreibung anderer Licht- und Schattenvorgänge bewährten Prinzip der Geradlinigkeit fest und führt die Abweichungen auf nichtgeometrische Ursachen, zurück insbesondere auf die Tatsache, daß der menschliche "Blick" in Form eines Kegels erfolgt und das innerhalb des Kegels wahrgenommene Licht als intensiver erfahren wird als außerhalb des Kegels wahrgenommenes Licht: "Weil die Blicke, die zu den äußersten Enden der geraden Linien abgespalten werden, schwach sind, sieht man die Stellen an den Winkeln nicht." [3].

Aufgrund dieser Antwort würde man jedoch erwarten, daß jede beliebige Lichtquelle hinter jeder beliebig geformten Öffnung gerundete Figuren erzeugt. Dem widerspricht aber die der zweiten Frage zugrunde liegende Beobachtung. Der Autor weiß sich auch hier zu helfen: Da die beiden Lichtkegel, die ihre Basis in der Sonne und auf den Boden haben, in der Enge des Loches mit ihren Spitzen zusammentreffen, müsse

das Bild auf dem Boden ebenso abgeschnitten erscheinen wie sich die halbmondförmige Sonne dem Betrachter zeigt.

Die durch PSEUDO- ARISTOTELES eingeführten, sich in der Öffnung schneidenden Lichtkegel blieben auch in den nachfolgenden Auseinandersetzungen mit dem Sonntalerphänomen erhalten. Sie "überlebten" sogar die Keplersche Revolution, um bis heute als ein konstruktives Standardelement der geometrischen Optik benutzt zu werden (siehe oben).

Diese Antworten müssen die nachfolgenden Optiker nicht befriedigt haben. Denn das Sonntalerproblem wurde in der Folgezeit (vor allem im 13. und 14. Jh.) immer wieder aufgegriffen. Aber auch sie gelangten - aus heutiger Sicht - trotz intensiver Bemühungen nicht wesentlich über die Vorstellungen von PSEUDO- ARISTOTELES hinaus [4]. Das lag zum Teil daran, daß das Problem in voller Allgemeinheit gar nicht gesehen wurde: So behandelte ROGER BACON in seiner Schrift *De multiplicatione specierum*, die wiederum vor allem auf der pseudo- euklidischen Schrift *De speculis* und ALKINDIS *De aspectibus* beruhte, nur kleine Öffnungen, die ihm unabhängig von der Lochform nur nahezu perfekte Sonntaler geliefert haben müssen. Demgegenüber benutzte JOHN PECHAM in seinem *Tractatus de perspectiva* zu große Öffnungen, bei denen die Abbildung der Sonne nicht, wie er erwartete, rund sondern von der Form des Loches hätte sein müssen. Jedenfalls zeigt seine Darstellung eine Diskrepanz zwischen Beobachtung und Erklärung. Auch die von WITTELO benutzten Öffnungen waren zu groß, um den Effekt der Überlappung des Bildes der Sonne und der Öffnung zu zeigen. Er versuchte, das Problem durch die rein logisch nur schwer nachzuvollziehende Aussage zu lösen, daß von einem Punkt ausgehendes, durch eine quadratische Öffnung passierendes Licht an den Ecken abgerundet wird, ohne von der Geradlinigkeit abzuweichen. Auch die späteren Arbeiten vor allem von HENRY VON LANGENSTEIN, BLASIVUS VON PARMA und LEVI BEN GERSON widmeten dem Problem der Sonntaler große Aufmerksamkeit. Sie schafften aber auch keine größere Klarheit als ihre

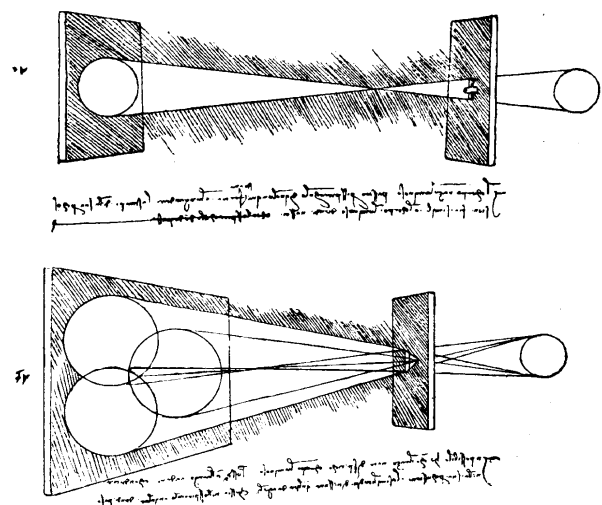


Abb. 11: Auch Leonardo da Vinci erkannte das Sonntalerproblem, ohne es im heutigen Sinne vollständig erklären zu können. (siehe Anm. 8).

Vorgänger (Abb. 11) (Einzelheiten siehe [4]). Insgesamt hinterlassen die Arbeiten des Mittelalters den allgemeinen Eindruck, daß man die geometrischen Prinzipien der Ausbreitung selbst für unzureichend hielt, das Sonnentalerproblem zu beschreiben. Beeindruckt vor allem von der "erzeugenden Kraft" des Lichts neigte man zu der Ansicht, daß es die Fähigkeit besitze, sich hinter eckigen Löchern von selbst abzurunden. Aus heutiger Sicht erstaunlich ist, daß man den darin enthaltenen Widerspruch zur geradlinigen Ausbreitung des Lichtes nicht erkannte oder übersah⁶. Jedenfalls empfand KEPLER derartige Erklärungen als "ungehörig und in der Optik nicht anerkannt"[5].

Trotz dieser "Dunkelheiten" (KEPLER) sollte der Wert der Arbeiten für die weitere Entwicklung nicht unterschätzt werden. Häufig lösen gerade die Schwachstellen in der Argumentation Forschungsaktivitäten aus, die schließlich zum Durchbruch führen. So führt auch KEPLER seine "Erleuchtung" auf die Auseinandersetzung insbesondere mit Arbeiten von PECHAM zurück: "Mir ist vor mehreren Jahren aus den Pisanischen (das ist PECHAM, Anm. von HJS) Dunkelheiten einiges Licht aufgeblitzt. Da ich nämlich den so sehr dunklen Sinn der Worte aus der ebenen Zeichnung nicht entnehmen konnte, so nahm ich meine Zuflucht zur... (eigenen Anschauung) in der Körperlichkeit. Ich brachte in der Höhe ein Buch an, das die Stelle des leuchtenden Körpers vertrat. Zwischen diesem und dem Erdboden wurde eine Tafel mit einem vieleckigen Loch befestigt; darauf wurde ein Faden von einer Ecke des Buchs durch das Loch nach dem Erdboden hin und her geführt, daß er die Ränder des Lochs streifte. Seinen Verlauf auf dem Fußboden zeichnete ich mit Kreide nach, wodurch ich auf dem Fußboden eine dem Loch ähnliche Figur erhielt. Dasselbe trat ein, wenn ich den Faden an der zweiten, dritten und vierten Ecke des Buchs anheftete und schließlich an unzähligen Punkten des Randes. Und so zeichnete die Reihe zahlloser zarter Abbildungen des Lochs die Größe und viereckige Figur des Buchs ab. Daraus ging also hervor, daß nicht die Rundung des Sehstrahls, sondern die der Sonne zur Lösung der Aufgabe beitrage, nicht weil dies die vollendete Figur ist, sondern weil dies im allgemeinen die Form des leuchtenden Körpers ist" [5].

4 Keplers optische Revolution

*Also daß es einer auß meinen Gedanken ist
Ob nicht die gantze Natur vnd alle himmlische Zierligkeit
in der Geometria symbolisirt sey.*

JOHANNES KEPLER

Ausgangspunkt für KEPLERS Aktivitäten im Bereich der Optik insbesondere im Zusammenhang mit dem Sonnentalerphänomen war ein Problem in der Astronomie. TYCHO BRAHE stellte angesichts der Beobachtung der Sonnenfinsternisse am 25. Februar des Jahres 1598 fest, daß der Neumond bei einer Sonnenfinsternis "nicht in der Größe erscheint, die er zu anderen Zeiten bei Vollmond hat, obwohl er dann genauso weit

von der Erde entfernt ist" [2, S. 5] (Abb. 12). Für KEPLER war dieser Befund "mehr als ein Rätsel". Zutiefst von der Gültigkeit der Himmelsmechanik überzeugt, also insbesondere von der Unveränderlichkeit der Bahnen und Größen der Himmelskörper, war es für ihn völlig inakzeptabel, darin wie einige seiner Zeitgenossen eine "Schrumpfung" des Mondes oder eine weitere Entfernung des Mondes von der Erde bei Sonnenfinsternissen zu sehen.

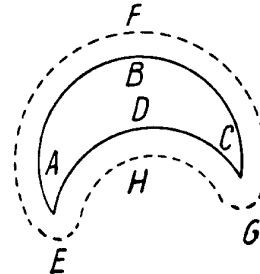


Abb. 12: In einem Brief an Mästlin vom 9. Sept. 1600 erklärt Kepler anhand dieser Skizze den Beobachtungsfehler bei Sonnenfinsternissen.

Er stellte stattdessen die allgemein anerkannte Beobachtungsmethode selbst in Frage. Sonnenfinsternisse beobachtete man nämlich zur Schonung der Augen nicht direkt, sondern in Gestalt der Sonnentaler, die hinter einer Öffnung auf einem Schirm entstanden. KEPLER fand schließlich heraus, daß man streng genommen nur im Falle einer sehr kleinen Öffnung und/oder in hinreichender Entfernung von einer Öffnung mit endlichem Durchmesser eine korrekte Abbildung des leuchtenden Gegenstandes erwarten konnte. Die beobachtete Mondverkleinerung von 20 % stellte sich daher als ein Beobachtungsfehler heraus, der darauf beruhte, daß der Projektionsschirm zu dicht hinter dem Loch angebracht war (Abb. 13).

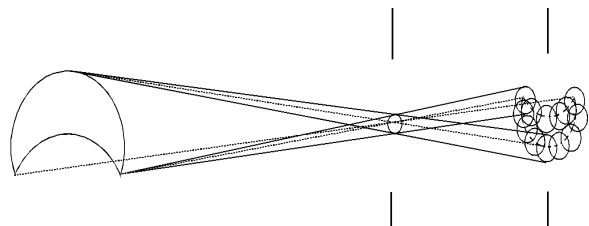


Abb. 13: Die durch die endliche Lochform bedingte Unschärfe läßt das Sichelbild größer und den angrenzenden Mondschaten entsprechend kleiner erscheinen.

So einfach diese Einsicht uns heute erscheinen mag, so aufwendig war es, sie zu erlangen. Weil man auf der Grundlage der damaligen optischen Kenntnisse nicht erkennen konnte, was KEPLER schließlich erkannte, war eine völlig neue "optische Sehweise" nötig: Indem er die Optik seiner Vorgänger "überarbeitete", schuf er nicht weniger als eine völlig neue geometrische Optik. Im Rahmen der Keplerschen Optik war es möglich, eine rein geometrische, quantitative Antwort auf das Sonnentalerproblem zu geben. Eine solche Antwort war aber nötig, um die astronomische Antinomie zu überwinden.

Im Sinne von THOMAS S. KUHN [6] kann die von KEPLER vollendete (geometrische) Optik als Ergebnis einer konzeptuellen Revolution gesehen werden, in

⁶ vgl. Anm. 2

dessen Mittelpunkt das Phänomen der Sonnentaler steht. Als Astronom, der die kopernikanische Wende mitgemacht hat, war er bereits vom neuzeitlichen physikalischen Denken beeinflusst. Jedenfalls war er von den mechanischen Gesetzen der Bewegung der Himmelskörper derart durchdrungen, daß er eine merkliche Größenveränderung von Himmelskörpern oder deren Bahnen für unmöglich hielt. Deshalb war er in der Lage, die Grenzen des bisher fraglos anerkannten Beobachtungssystems zu überwinden und einer kritischen Betrachtung zu unterziehen.



Abb. 14: Die anschauliche Paradoxie von Bild und Lochform gleicht in gewisser Weise der in diesem Bild aus dem Jahre 1647 dargestellten Umkehrung der prinzipiell unmöglichen Quadratur des Kreises: *Mutat quadrata rotundis*.

Demnach vermochte er nicht zuletzt aufgrund seiner neuzeitlichen Überzeugungen im Bereich der Astronomie die noch völlig im aristotelischen Geist betriebene Optik aus kritischer Distanz zu betrachten und Ungereimtheiten in den Erklärungen seiner Vorgänger zu entdecken: Im Sinne einer geometrisch ausgerichteten Optik lehnte er die Gültigkeit nichtgeometrischer Argumente ab. Vielmehr sah er in der von den mittelalterlichen Optikern behaupteten Geradlinigkeit und der aus "dunklen Gründen" gleichzeitig für möglich gehaltenen Abrundung der Abbildungen eine auserlesene Paradoxie (Abb. 15). Und die erwies sich für

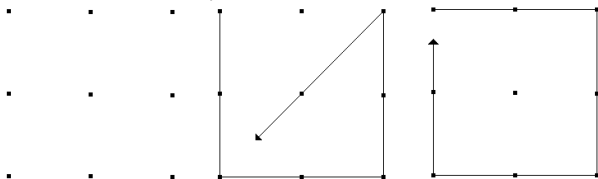


Abb. 15: Wie kann man die neun Punkte mit nur vier Geradenabschnitten in einem polygonalen Zug verbinden? Die Lösung befindet sich in Abb. 16

KEPLER als epistemologisches Warnlicht, dessen Blinken anzeigte, daß die bisherige Konstruktion der geometrischen Optik nicht mehr paßte: *"Der Stein des Anstoßes wurde zum Eckstein des Neuen"* [7]. Für KEPLER war eines klar: Entweder man hat eine punktförmige Lichtquelle, dann lassen sich alle Phänomene mit der Geradlinigkeit der Lichtausbreitung erklären. Oder man hat eine leuchtende Fläche, dann kommt es zu jenen Abweichungen von der Geradlinigkeit, die wir hier als Phänomen der Sonnentaler umschrieben haben. Indem er das in dieser Alternative angelegte Tertium non datur zu überwinden vermochte, gelangte er zu einem neuen System: Er sah eine ausgedehnte Lichtquelle als Ensemble unendlich vieler Punktlichtquellen an, deren geradlinig radial in alle Richtungen der Hemisphäre ausgehenden Lichtstrahlen sich ohne gegenseitige Störung zu überlagern vermochten⁷. Nach diesem Durchbruch war es für KEPLER ein Einfaches, auch die Phänomene der Brechung und Dispersion anzugehen und seinen Nachfolgern eine weitgehend geschlossene geometrische Optik zu übergeben. Neben der "Keplerschen Revolution" [8] im Bereich der Astronomie ist KEPLER, was allgemein weniger bekannt ist, die Erschaffung einer neuen Wissenschaft des Lichts und des Sehens zu verdanken. Er kann daher mit Recht als Vater der modernen Optik angesehen werden. Im Nachhinein erscheint die Keplersche Neugestaltung der geometrischen Optik so naheliegend und einfach, daß sich die Frage stellt, wieso die Lösung nicht schon früher erreicht wurde, zumal alle Prinzipien, von denen er Gebrauch machte, bekannt waren⁸. Entscheidend für diese Einschätzung ist aber, daß man den Blick, unter dem das Sonnentalerproblem als so einfach erscheint, erst einmal angenommen haben muß. KEPLERs Leistung besteht daher vor allem darin, daß er einen Ausweg fand aus dem Labyrinth sich widersprechender Prinzipien, in dem sich die Optik befand. Dazu war es nötig die Grenzen des bis dahin gültigen Denkens zu überwinden und die Ergebnisse der optischen Untersuchungen gewissermaßen von außerhalb mit ganz neuen Augen zu betrachten⁹.

Bildhaft gesprochen, sah sich KEPLER der Aufgabe gegenüber, die in Abb. 15 (links) dargestellten neun Punkte in einem einzigen polygonalen Zug ohne abzusetzen mit nur vier Geraden miteinander zu verbind-

⁷ Das anschauliche Paradox wurde auf diese Weise aus dem physikalischen Blickfeld auf das mathematische verschoben.

⁸ Leonardo da Vinci beispielsweise fehlte nur die Idee, eine flächenhafte Lichtquelle als Ensemble von Punktlichtquellen anzusehen (Abb. 11). Ansonsten vermochte er die geometrische Sehweise sehr verständlich zum Ausdruck zu bringen: „Perspektive ist das sichtbare Gesetz, nach dem wie die Erfahrung bestätigt, alle Dinge ihr Ebenbild in pyramidalen Linien zum Auge schicken; und die Körper gleicher Größe werden je nach der Entfernung eine Pyramide mit mehr oder weniger spitzem Winkel bilden. Als pyramidale Linien versteh ich solche, die von den Begrenzungen der Körperoberflächen ausgehen und in der Entfernung zusammenlaufen zu einem einzigen Punkte führen. Als Punkt wird bezeichnet, was sich an keiner Stelle teilt, und dieser Punkt ist derjenige, der sich im Auge befindet und in sich alle spitzen der Pyramide empfängt“ [9].

⁹ Mehrere Jahrzehnte vor Kepler hatte bereits der Benediktinermönch Francesco Maurolico das Sonnentalerproblem gelöst. Zu Beginn unseres Jahrhunderts stellte sich heraus, daß auch der arabische Optiker Ibn Al Haitam über eine im Prinzip korrekte Beschreibung verfügte. Von beiden Arbeiten konnte Kepler keine Kenntnis gehabt haben. Hinzu kommt, daß Kepler über eine isolierte Beschreibung des Phänomens hinaus mit deren Hilfe zu einem formalen Abschluß der geometrischen Optik gelangte.

den. Die *Abbildungen 15* (Mitte und rechts) sollen andeuten, daß dies auf die gewohnte Weise nicht gelingen kann. Erst der grenzüberschreitende Blick erlaubt es, das Problem zu lösen (*Abb. 16*).

5 Die Lernschwierigkeiten

Was man weiß, sieht man erst

JOHANN WOLFGANG VON GOETHE

In der Schulphysik wird die physikalische Einfachheit der geometrisch-optischen Phänomene häufig mit Einfachheit an und für sich gleichgesetzt. Dabei wird unterstellt, daß die physikalische Darstellung gewissermaßen nur eine prägnante und begrifflich bereinigte Darstellung des realen Ablaufs der Vorgänge sei, so wie wir sie unmittelbar erleben. Dementsprechend werden die in den geometrischen Konstruktionen auftretenden Strahlengänge als reale Lichtwege aufgefaßt, die auf direkt nachvollziehbare Weise gewissermaßen durch den Griffel der Natur selbst gezeichnet würden¹⁰.

Derartige post-hoc-Argumente aus der Sicht des bereits Verstehenden verkennen die Lernschwierigkeiten der Schüler beim Umgang mit angeblich so naheliegenden Sachverhalten [1]. Die Ausbreitung des Lichtes, die Transformation des Lichtkontinuums in ein Ensemble unendlich vieler Strahlen und die Hervorhebung einzelner Strahlen stellen elaborierte, durch die physikalische Sehweise geleitete Aktivitäten dar, die erst einmal erarbeitet und erlernt werden müssen. Wie schwierig die Vorgänge aber selbst dann noch sind, wenn man das Lichtstrahlkonzept bereits erworben hat, zeigt beispielsweise KEPLERS Bindfadenkonstruktion (siehe oben), mit der er seiner Anschauung auf die Sprünge verhalf. Seine ausführliche Beschreibung des eigenen Vorgehens ist übrigens eine der in der neuzeitlichen Physik seltenen Stellen, in der Erkenntnisvorgänge nachgezeichnet werden, was in der Folgezeit immer seltener geschieht und schließlich zugunsten des fertigen Ergebnisses völlig wegrationalisiert wird.

Angesichts der Keplerschen Einlassung muß man sich als Lehrer fragen, ob das, was KEPLER recht ist, unseren Schülerinnen und Schülern nicht billig sein sollte. Verwerfen wir nicht häufig Anschauungshilfen der beschriebenen Art als zu primitiv ("Wir dürfen die Schüler nicht unterfordern!"), nur weil sie uns aus der physikalischen Perspektive heraus primitiv erscheinen? KEPLERS Beispiel sollte auch zeigen, welche Anschauungsprobleme für Schülerinnen und Schüler im Bereich "einfacher" geometrisch-optischer Phänomene auftauchen können.

Viele Lernschwierigkeiten resultieren u.E. weniger aus der Kompliziertheit der Sachverhalte, als vielmehr aus der besonderen (physikalischen) Art und Weise, die Dinge zu sehen und zu beschreiben. Sie sind daher in den häufig anzutreffenden Bemühungen der Lehrenden begründet, die Differenz zwischen lebensweltli-

cher und physikalischer Sehweise einzuebnen, anstatt sie erkennbar und damit überwindbar zu machen [12]. Man muß sich m.E. fragen, ob es für unsere Schülerinnen und Schüler nicht leichter wäre, die im Unterricht diskutierten optischen Konstruktionen als Artefakte, d.h. als Erfindungen kennenzulernen, die sich als erfolgreich bei der physikalischen Darstellung und Erklärung optischer Phänomene erwiesen und schließlich einen physikalischen Blick ermöglicht haben, der es erlaubt, die Phänomene im Lichte der Konstruktionen zu sehen. Hilft man die Schülerinnen und Schüler nicht, wenn man klarstellt, daß derartige Konstruktionen beispielsweise nichts darüber aussagen, wie und auf welchem Wege das Licht vom Gegenstand zur Projektionsfläche gelangt? Zwingt man sie andernfalls nicht geradezu, eine eindeutige Beziehung zwischen den an und für sich nicht existierenden, allenfalls apparativ und dann auch nur sehr approximativ herzustellenden Lichtstrahlen zu suchen? Da ihnen dies nicht gelingen kann, besteht die Gefahr, daß sie die Optik als schwer und unverständlich empfinden und angesichts der von den Lehrenden immer wieder betonten Einfachheit an den eigenen Fähigkeiten zu zweifeln beginnen.

Ein weiterer Vorteil eines rein pragmatischen, modellmäßigen Zugangs zur Optik besteht darin, daß auch die Erklärungen komplizierter Phänomene, wie z.B. Beugungs- und Interferenzerscheinungen, leichter akzeptiert werden können. Denn dann würde man gar nicht erst versuchen, eine an Steinwurf oder Wasserstrahl orientierte Vorstellung der Lichtausbreitung zugrunde zu legen, was – wie man weiß – in einer Aporie enden müßte.

Eine angemessene Diskussion der langwierigen Geschichte der Optik am Beispiel der Sonnentaler kann u. E. helfen, Verständnis für die Probleme der Schülerinnen und Schüler zu entwickeln. Angesichts der Tatsache, daß hier die klügsten Köpfe ihrer Zeit ähnliche Schwierigkeiten offenbarten, zeigt, daß das Problem tiefer liegt als in der Unlust oder der Dummheit der Schülerinnen und Schüler.

Literatur

- [1] SCHLICHTING, H.J.: Physik - eine Perspektive der Realität. Probleme des Physikunterrichts. Physik in der Schule 34/9, 283-288 und 34/10, 339-342 (1996)..
- [2] TYCHO BRAHE: Tychonis Brahe Dani Opera Omnia Bd. 8, p. 55; zit. nach: Straker, S.M.: Kepler's Optics. Indiana University, Ph. D., 1971
- [3] ARISTOTELES: Problemata Physica. Berlin: Akademie-Verlag 1962, Buch XV, Probl. 6 und 11.
- [4] D. C. LINDBERG: The Theory of Pinhole Images from Antiquity to the Thirteenth Century. Archive for History of Exact Sciences 5 (1968), 154. ders.: The Theory of Pinhole Images in the Fourteenth Century. Archive for History of Exact Sciences 6 (1970), 299.
- [5] J. KEPLER: Ad Vitellionem paralipomena (1604). Übersetzt als: "J. Keplers Grundlagen der geometrischen Optik", von F. Plehn. Leipzig: Akadem. Verlagsgesellschaft 1922, S. 14.
- [6] T.S. KUHN: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Frankfurt: Suhrkamp 1973

¹⁰ Wie eine nichtrepräsentative Befragung von Lehrerinnen und Lehrern ergab, ist diese Auffassung sehr verbreitet.

- [7] P. WATZLAWICK: Die erfundene Wirklichkeit. München: Piper 1981, S.231
- [8] J. MITTELSTRASS: Kopernikanische oder Keplerische Wende?- Keplers Kosmologie, Philosophie und Methodologie. Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich 134/3 (1989), 197.
- [9] L. DA VINCI: zit. nach: C. ZAMMATICO, A. MARINONI, A.M. BRIZIO: Leonardo der Forscher. Stuttgart, Hamburg, München: Deutscher Bücherbund o. J. S. 133f
- [10] LINDBERG, D.C.: Auge und Licht im Mittelalter. Frankfurt: Suhrkamp 1987, S.312ff
- [11] E. WIEDEMANN: Über die Camera obscura bei Ibn al Haitam. Sitz. Ber. d. phys.- mediz. Sozietät Erlangen 45 (1914),155.
- [12] H. J. SCHLICHTING: Galilei und der physikalische Blick. Physik in der Schule 32/4 (1994), 154.
- [13] WAGENSCHHEIN, M. : Zum Begriff des exemplarischen Lehrens. In: Ursprüngliches Verstehen, Bd.1. Stuttgart: Klett 1970, S. 302.
- [14] A. LANGKAVEL: Astronomie life im Klassenraum. MNU 44/7 (1991) 412; ders.: Eine ungewöhnliche Ortsbestimmung MNU 46/6 (1993) 347.
- [15] H. J. SCHLICHTING: Sonnentaler- Abbilder der Sonne. Praxis der Naturwissenschaften- Physik 43/4 (1994), 19.

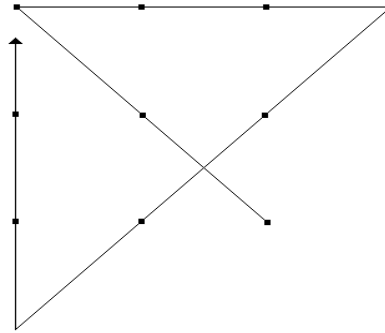


Abb. 16: Erst die Überschreitung der Systemgrenzen erlaubt die Lösung eines für unlösbar gehaltenen Problems.