Das Mondrätsel und die Erfindung der modernen Optik

Thomas Quick & Johannes Grebe-Ellis

Bergische Universität Wuppertal
quick@uni-wuppertal.de, grebe-ellis@uni-wuppertal.de

Kurzfassung

In der europäischen Astronomie des 16. Jahrhunderts war es üblich, die Größen von Sonne und Mond mithilfe einer Lochkamera zu bestimmen. Die Erschließung des Monddurchmessers aus dem konkaven Randstück der teilverdeckten Sonne führte jedoch zu Werten, die rätselhaft blieben, solange keine Theorie der Lochkamera existierte, die den Einfluss der Lochblende korrekt berücksichtigte. Auf diese Unstimmigkeiten aufmerksam geworden führte der junge Johannes Kepler am 10. Juli 1600 Messungen während einer Sonnenfinsternis in Graz durch. Nur kurze Zeit später präsentierte er in seinen Aufzeichnungen eine vollständig ausgearbeitete Theorie der Lochkamera, die bis heute gültig ist. Im folgenden Beitrag zeichnen wir den historischen Weg zur Formulierung dieser Theorie anhand ausgewählter Originalarbeiten von Kepler und Brahe nach und stellen eine Reihe veranschaulichender Experimente vor, die sich auch für den schulischen Einsatz eignen. Die damit präsentierte Episode aus der Geschichte der Optik dient zugleich auch als exemplarische Fallstudie, mit der NoS-Aspekte im Physikunterricht reflektiert werden können.

1. Einleitung

Am frühen Nachmittag des 10. Juli 1600 bereitete sich der junge Johannes Kepler (Abb. 1, links) auf dem Marktplatz in Graz auf die bevorstehende Sonnenfinsternis vor (Marek 1971, S. 138). Gemäß der Vorhersage würde der Mond auf dem Höhepunkt der Finsternis fast die Hälfte der sichtbaren Sonnenoberfläche verdecken. Mithilfe eines selbstgefertigten Lochkamerainstruments wollte Kepler die Finsternis vermessen und aus der Projektion der teilweise verdeckten Sonne den scheinbaren Durchmesser der beiden Himmelskörper, Sonne und Mond, bestimmen. Auf diese Weise, so hoffte Kepler, würde er Klarheit über einige von Tycho Brahe (Abb. 1, rechts) aufgebrachte astronomische Unstimmigkeiten gewinnen.

Trotz des Mangels an einer umfassenden Theorie verbreitete sich unter den europäischen Astronomen spätestens in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts die Lochkameraprojektion als Methode, die Sonne und ihre Finsternisse auf einem Schirm zu beobachten und zu vermessen (Straker 1981, S. 267). Aus den Proportionen des Lochkamerabildes ließ sich die scheinbare Größe der beteiligten Himmelskörper berechnen. Allerdings führte die Methode zu Abweichungen gegenüber der direkten Beobachtung, die korrigiert werden mussten. Beispielsweise fielen die Ergebnisse für die Winkelausdehnung der Sonne systematisch zu groß aus. Brahe, der königliche Astronom in Prag, war einer der ersten, der den Einfluss der Blendenöffnung auf das Lochkamerabild berücksichtigte und vernünftige Ergebnisse erzielte, indem er den Blendendurchmesser vom Lochkamerabild der Sonne subtrahierte (ebd.). Eine besondere Herausforderung an die Lochkameramethode stellte die Bestimmung des Monddurchmessers während einer Sonnenfinsternis dar (siehe Abb. 2). Man verwendete dazu den konkaven Rand der teilverdeckten Sonne. Es stellte sich jedoch

Abb. 1: Links: Der junge Kepler (1571-1630) in Graz, Medaillon, 1597 (aus Ehtreiber *et al.* 1994, S. 23). Rechts: Der königliche Hofastronom Tycho Brahe (1541-1601) in Prag (aus Christianson 2020, *S.* 184).

heraus, dass die so ermittelten Werte für die scheinbare Größe des Mondes stets kleiner waren als bei direkter Sicht auf den Vollmond. Brahes Schlussfolgerungen aus diesem ‚Mondrätsel' deuteten auf Anomalien in der Astronomie und den Himmelsbewegungen hin, die das Interesse des 28-jährigen Kepler weckten.

Gegen 13:30 Uhr richtete Kepler sein Lochkamerainstrument auf dem Grazer Marktplatz aus und notierte sorgfältig die Messwerte in sein Notizbuch. Was sich zu diesem Zeitpunkt noch nicht abzeichnete: Wenige Tage später würde er eine vollständig ausgearbeitete Theorie der Lochkamera in seinem Notizbuch festhalten, die nicht nur das Rätsel um die scheinbare Verkleinerung des Mondes klärte, sondern auch den Weg für eine neue 'optische Sichtweise' ebnete (Schlichting 2021). Rückblickend kann die Sonnenfinsternis von 1600 und die Auseinandersetzung mit dem Mondrätsel als ein wissenschaftsgeschichtlich bedeutendes Ereignis betrachtet werden. Mit Keplers Lochkameratheorie wurden die Grundlagen

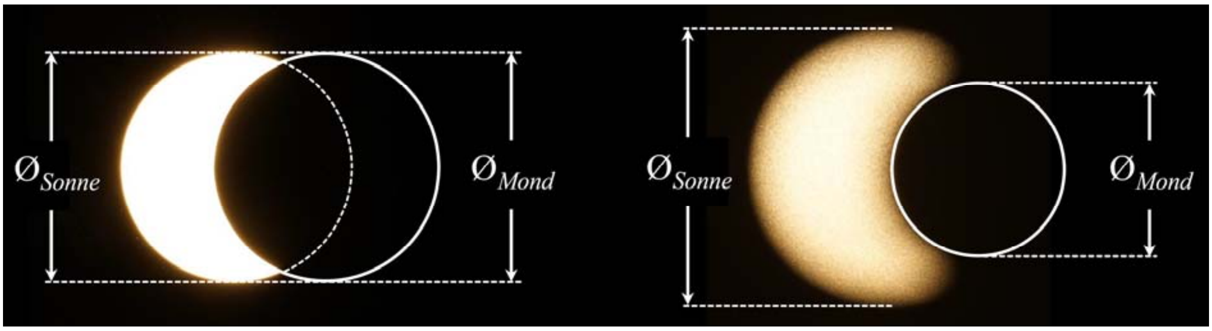

Abb. 2: Das Mondrätsel: In direkter Sicht (links) erscheinen Sonne und Mond etwa gleich groß. Im Gegensatz dazu erscheint die Sonne im Lochkamerabild (rechts) vergrößert, und der Durchmesser des Mondes, abgeleitet aus dem Radius des verdeckten Teils der Sonne, ist verkleinert. Die Fotos wurden mit dem experimentellen Aufbau aus Abbildung 5 realisiert.

der geometrischen Optik gelegt, die noch heute im Schulunterricht gelehrt werden.

In diesem Beitrag zeichnen wir den historischen Verlauf der Entwicklung von Keplers Lochkameratheorie nach, basierend auf ausgewählten Originalbeiträgen und unter besonderer Berücksichtigung von Quellenmaterial von Kepler und Brahe. Die Darstellung dieser wissenschaftshistorischen Episode wird durch eine Reihe von Experimenten ergänzt, die auch im schulischen Kontext durchführbar sind. Im ersten Abschnitt beleuchten wir die Vorgeschichte des Mondrätsels, die bis in die Antike zurückreicht und mit Brahes Untersuchungen zur Bildentstehung in der Lochkamera sowie seinen fragwürdigen Schlussfolgerungen endet. Der zweite Abschnitt widmet sich dem kurzen Zeitraum zwischen Keplers Beobachtung der Sonnenfinsternis am 10. Juli 1600 und der Formulierung seiner Lochkameratheorie wenige Tage später. Keplers Aufzeichnungen zeigen eine Theorie, die scheinbar aus dem Nichts entstand. Die Fülle und Genauigkeit seiner Aufzeichnungen begünstigt in besonderer Weise, nach den Voraussetzungen von Keplers Intuition zu fragen. Im dritten Abschnitt diskutieren wir Keplers 'Lichtfiguren', die er im zweiten Kapitel seines Werks ‚Ad Vitellionem Paralipomena' behandelte, das 1604 als Teil seiner umfangreichen ‚Astronomica Pars Optica' veröffentlicht wurde.

Das mit der Entwicklung der Lochkameratheorie verbundene Mondrätsel bietet einen interessanten und historisch bedeutsamen Kontext für die Behandlung der Lochkamera im Physikunterricht. Einerseits ermöglicht die Theorie nach Kepler eine Berücksichtigung von Aspekten, die über die ideale Lochkamera hinausgehen und den geometrischen Einfluss der Öffnungsblende einbeziehen. Andererseits dient diese Episode aus der Geschichte der Optik als exemplarische Fallstudie zur Reflexion über die Arbeitsweise Keplers im besonderen und die Entstehung von Theorien im allgemeinen. Auf einige dieser Aspekte gehen wir am Ende des Beitrags ein.

2. Vom Sonnentaler zum Mondrätsel

Die Frage, wie Lochkamerabilder hinter Öffnungen mit endlicher Ausdehnung entstehen, hat Gelehrte

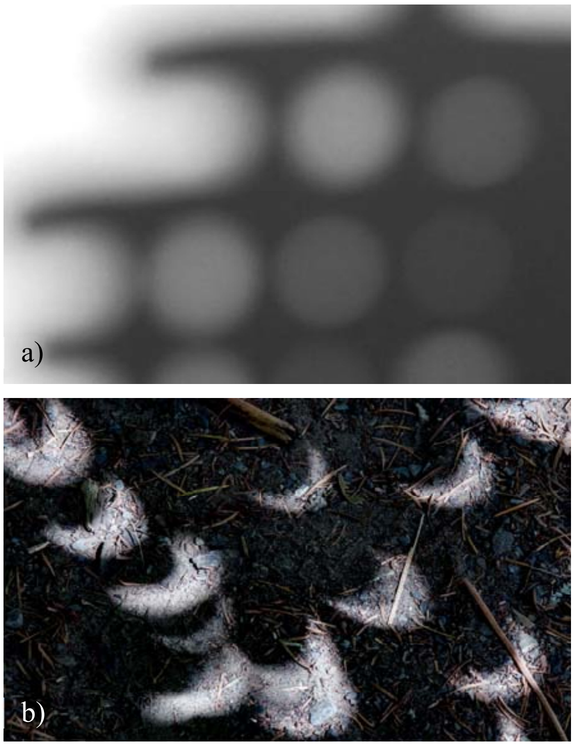

Abb. 3: Wie Sonnentaler hinter gekreuzten Fingern (a) oder Sonnensicheln während einer Sonnenfinsternis (b) entstehen, gab Gelehrten seit der Antike Rätsel auf. Foto (a) eigene Aufnahme, (b): Bill Gozansky (Alamy Stock Photo)

seit der Antike beschäftigt und ist eng mit dem Phänomen der ‚Sonnentaler' verbunden (Lindberg 1968, Schlichting 1995). Beispielsweise wird in Buch XV der pseudo-aristotelischen Schrift ‚Problemata physica' (Naturprobleme), einer Sammlung von 890 Problemen aus zahlreichen Wissensgebieten, die Entstehung von Lochkamerabildern diskutiert. In Frage 6 heißt es dort (Aristoteles 1991, S. 138):

> *Warum erzeugt die Sonne, wenn sie durch viereckige Gebilde dringt, nicht rechteckig gebildete Formen sondern Kreise, wie z.B. wenn sie durch Flechtwerk dringt?*

In Frage 11 desselben Buchs werden auch die Lochkamerabilder der Sonne während einer Sonnenfinsternis diskutiert (ebd., S. 141):

Warum treten bei Sonnenfinsternis, wenn man durch ein Sieb oder durch Blätter(lücken) sieht, etwa einer Platane oder eines anderen breitblättrigen Baumes, oder wenn man die Finger der einen Hand mit der der anderen verflechtet, die Sonnenstrahlen auf der Erde halbmondförmig in Erscheinung?

Das allgemeinere ‚Fensterproblem' (eckige Fenster werfen abgerundete Schatten) war in der mittelalterlichen Forschung ebenfalls bekannt, wurde aber erst von Kepler mit der Lochkamera als Spezialfall verknüpft. Es war bekannt, dass sich die geometrischen Formen von Sonne und Öffnungsblende je nach Situation unterschiedlich in den Lochkamerabildern bemerkbar machen konnten. Allerdings stellte das Auftreten von kreisförmigen oder halbmondähnlichen Abbildern der teilverdeckten Sonne hinter quadratischen oder dreieckigen Öffnungen eine große Herausforderung für die akzeptierten Prinzipien der geradlinigen Lichtausbreitung dar (Schlichting 1995). Einige Optiker beriefen sich auf Aristoteles und sprachen von einer unerklärlichen 'Abschwächung' der peripheren Licht- oder Sehstrahlen, wodurch das Bild nicht die Form der Öffnung annahm. Andere nahmen nach Pecham und Witelo an, dass Licht die Fähigkeit besitzt, sich hinter eckigen Öffnungen 'abzurunden' (ebd.). Viele dieser Überlegungen sind aus heutiger Sicht nur schwer nachvollziehbar. Ibn Al-Haitham, auch bekannt als Alhazen, hatte zwar bereits im 11. Jahrhundert eine korrekte Theorie zur Bildentstehung durch endliche Öffnungen formuliert, seine Beiträge waren in der westlichen Welt jedoch weitgehend unbekannt (Lindberg 1968, S. 156; Belting 2008, S. 104ff).[1]

Versuch I: Sonnentaler erzeugen

Lochkamerabilder der Sonne lassen sich schon mit einfachsten Mitteln erzeugen, so z.B. mit kreuzweise übereinander gelegten Fingern beider Hände (siehe Abb. 3a). Die durchschnittliche Winkelgröße der Sonne beträgt $\alpha = 0{,}53° \approx 1/108$ rad. Man kann die Bildgröße B der mit überkreuzten Fingern erzeugten Sonnenbilder abschätzen, indem man die Faustregel $B/b \approx 1/100$ rad verwendet, wobei b die Projektionsentfernung, d.h. die Bildweite ist. Kepler erzeugte mit seiner Lochkamera bei einer Bildweite von 4 m Sonnenbilder von etwa 40 mm Durchmesser. Um größere und vor allem kontrastreichere Sonnenbilder zu erzeugen, kann man die Sonne mit einem kleinen Taschenspiegel, der mit einer variablen Öffnungsblende bedeckt ist, in sonnenabgewandte Innenräume projizieren (siehe Abb. 4).

Spätestens im 16. Jahrhundert wurde die Lochkamera zu einem astronomischen Instrument. Auf diese Weise konnte die Sonne und ihre Verfinsterung bequem und augenschonend beobachtet werden. Auch Tycho Brahe passte die meisten seiner Instrumente an. Für die Astronomie der damaligen Zeit war das Studium der Finsternisse von zentraler Bedeutung. Sie boten die einzige Möglichkeit, die Meridiandifferenzen zwischen verschiedenen Orten zu bestimmen und waren daher entscheidend für das Studium der Bewegungen von Sonne und Mond. Astronomen wie Kepler, die das heliozentrische Weltbild von Kopernikus befürworteten, mussten sich auf präzise Theorien der Finsternisse stützen, um die Planetenbewegungen auf der Basis der bekannten Bewegungen von Erde und Sonne richtig zu interpretieren. Daher bestand ein großes Interesse daran, aus den Lochkamerabildern von Sonne und Mond auf die korrekten astronomischen Winkelausdehnungen zu schließen.

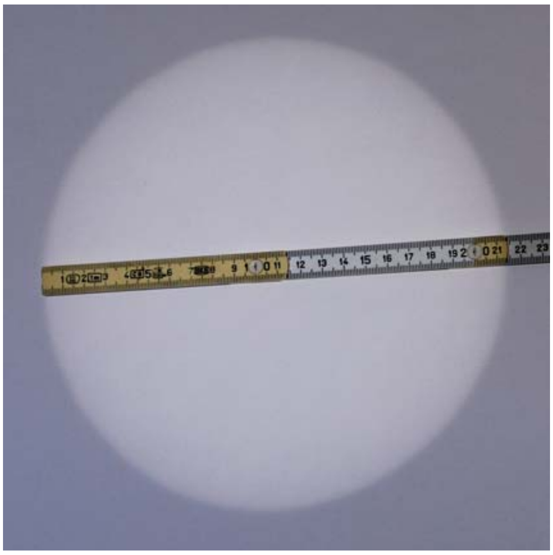

Abb. 4 Lochkamerabild der Sonne mit $B = 21{,}4$ cm, projiziert aus einer Entfernung von $b = 2255{,}0$ cm mit einer Spiegelblende von $D_A = 6$ mm in einen dunklen Raum. Mit $B/b \approx 1/105$ beträgt die Abweichung vom theoretischen Wert 1/108 aufgrund der Ausdehnung der Blendenöffnung 2,7%.

Versuch II: Simulation einer Sonnenfinsternis

Um die geometrischen Bedingungen einer Sonnenfinsternis nachzubilden (siehe Abb. 5), verwenden wir eine große Lichtquelle, die aus einer Halbkugel (⌀ = 30 cm) besteht, deren Inneres mit einer hochmatten weißen Oberfläche beschichtet ist und von vier 500W-Halogenlampen beleuchtet wird. Vor der Leuchte befindet sich eine kreisförmige Öffnungsblende aus Stahl mit einem Durchmesser von G = 19

[1] Die westliche Geschichte der Lochkamerabilder, die durch Öffnungen endlicher Größe der Lochblende entstehen, scheint weitgehend unabhängig von Alhazen zu sein. In seiner *Perspectiva* (arab. *Kitāb al-Manāẓir*) diskutiert Alhazen lediglich die ideale Lochkamera, bei der die Lochblende als punktförmige angenommen wird. Seine vollständige Lochkameratheorie findet sich in seinem Traktat *Über die Form der Sonnenfinsternis*, in dem er die Entstehung von Lochkamerabildern bei Sonnenfinsternissen detailliert beschreibt. Dieses Werk war bis ins 20. Jahrhundert ausschließlich in arabischer Sprache verfügbar und daher im Westen unbekannt (Lindberg 1968, S. 156).

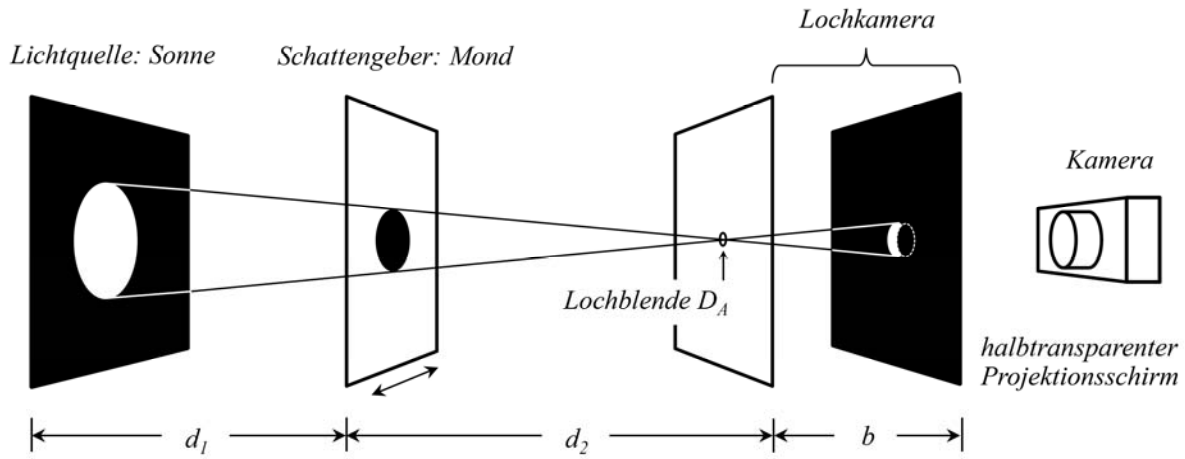

Abb. 5: Abbildung einer simulierten Sonnenfinsternis mithilfe einer Lochblende auf einen halbtransparenten Schirm, der von hinten betrachtet wird.

Abb. 6: Sonnenfinsternis, simuliert mit dem im Abbildung 5 gezeigten Aufbau und einer Blendenöffnung von D_A = 1 mm.

cm, welche die Sonnenscheibe darstellt. Eine kreisförmige Hindernisblende (Mond) mit gleicher Winkelausdehnung verdunkelt nach und nach die Sonnenscheibe (siehe Abb. 5). Mit einer Lochblende (Durchmesser D_A = 1 mm) bilden wir das Szenario auf einem halbtransparenten Schirm ab, den wir von hinten beobachten (siehe Abb. 6).

Viele Astronomen gingen ursprünglich davon aus, dass sie ihre Berechnungen der Sonnengröße auf die ideale Lochkamera beziehen könnten, d.h. dass die Ausdehnung der Blende vernachlässigbar sei und als punktförmig angenommen werden könne.[2] Die dadurch entstehenden Abweichungen zwischen direkt beobachteter Winkelausdehnung der Sonne und Größe des Lochkamerabildes führten Brahe dazu, als einer der ersten die Lochblende in seinen Berechnungen der scheinbaren Größe der Sonne zu berücksichtigen, indem er einen Durchmesser der Lochblende vom gemessenen Durchmesser des Lochkamerabildes der Sonne abzog. Diesem Verfahren lag keine theoretische Erklärung zugrunde; es handelte sich um eine heuristische Regel zur Korrektur des Lochkamerabildes der Sonne, die sich empirisch bewährte.[3] Weshalb Brahe diese Regel nicht auch auf die Kontur des Mondes im Lochkamerabild der teilverdeckten Sonne anwendete, stellt eine bis heute nicht weiter aufgeklärte wissenschaftshistorische Merkwürdigkeit dar (Straker 1981, S. 277).

Versuch III: Brahes empirische Regel

Wir verwenden weiter den Aufbau aus Versuch II, jedoch ohne die Mondscheibe. Die Lichtquelle (Sonne) befindet sich in einem Abstand von g = 285,0 cm zur Lochblende mit einem Durchmesser von D_A = 4,0 mm. Die Blende selbst ist in einem Abstand von b = 45,0 cm zur Leinwand positioniert. Ohne Vergrößerung durch die Lochblende, d.h. im Fall der idealen Lochkamera, würden wir einen Sonnenbilddurchmesser von $B_{ideal} = (G/g)\cdot b$ = 30 mm erwarten. Tatsächlich erhalten wir jedoch B_S = 34 mm (vgl. Abb. 2, rechts). Dieses Ergebnis illustriert Brahes heuristische Regel, die besagt, dass die Abweichung der Größe des Sonnenbildes vom scheinbaren Sonnendurchmesser in etwa dem Durchmesser der Blende entspricht. Gleichzeitig zeigt dieses Experiment, dass dieses Ergebnis auch mit einem Aufbau erzielt

[2] Diese Einschränkung scheint auf die Wirkung des Werks ‚De Radio Astronomica et Geometrico‘ von Gemma Frisius (1508 – 1555), flämischer Mathematiker und Geograph, zurückzugehen. Frisius nutzte die Lochkamera erstmals dokumentiert zur Beobachtung der partiellen Sonnenfinsternis im Jahr 1544. Seine dort formulierte Messmethode läuft auf die falsche Annahme hinaus, dass die Größe der Blende vernachlässigt werden kann, wenn sie klein genug ist (Straker 1981, S. 270f). Frisius' Arbeit trug wesentlich dazu bei, die Camera Obscura als wichtiges Instrument in der astronomischen Forschung zu etablieren.

[3] Brahe hat seine Korrekturmethode an keiner Stelle explizit formuliert oder dokumentiert, vielmehr implizit angewendet. Dennoch war er der erste, der die Größe der Blendenöffnung explizit in seinen Aufzeichnungen notierte. Straker (1981, S. 275) macht einen Vorschlag, wie Brahe zu einer geometrischen Begründung gelangt sein könnte, ohne eine vollständige Lochkameratheorie zu besitzen.

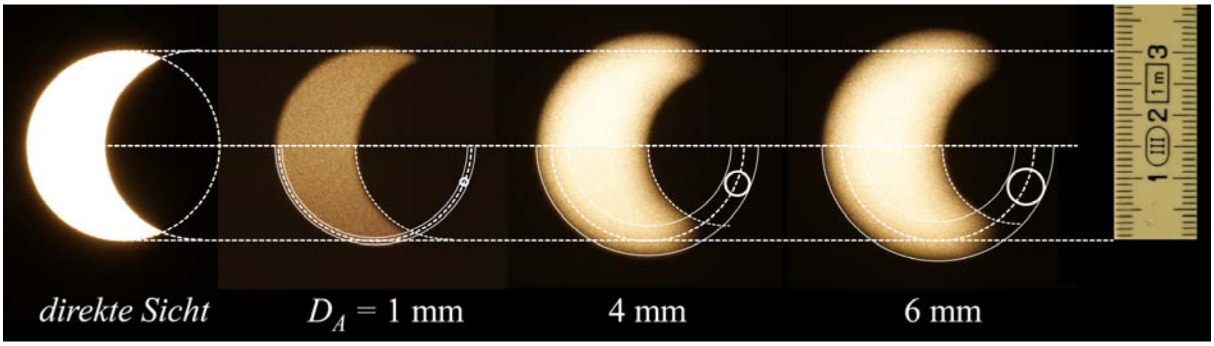

Abb. 7: Simulierte Sonnenfinsternis in direkter Sicht (links) und Lochkamerabilder dieser Situation, abgebildet mit einer zunehmend vergrößerten Blendenöffnung D_A. Die resultierenden Bildgrößen für die jeweiligen Sonnen- und Monddurchmesser B_S und B_M legen folgende Regel nahe: $B_{ideal} = B_S - D_A = B_M + D_A$.

werden kann, der nicht strikt den Bedingungen einer annähernd unendlich weit entfernten Lichtquelle entspricht.

In einem Brief an Michael Mästlin[4] berichtete Brahe über die Beobachtungen der Sonnenfinsternis am 25. Februar 1598. Diese Beobachtungen deuteten indirekt auf Unstimmigkeiten innerhalb der Astronomie hin. Brahe schreibt (1913, S. 55):

> *Wahrhaftig, es muss anerkannt werden, dass der Mond während einer Sonnenfinsternis nicht dieselbe Größe hat wie während anderer Zeiten bei Vollmond, wenn er gleich weit entfernt ist; sondern es scheint, als wäre er um etwa 1/5 verengt, durch Ursachen, die anderswo offenbart werden sollen. Es scheint also, dass der Mond die Sonne niemals vollständig verdunkeln kann, und selbst wenn der Mond sich zentral dazwischen schiebt, umkreist ihn das verbleibende Licht der Sonne... Obwohl der Durchmesser des Mondes nach unseren Berechnungen damals 34' 45'' hätte betragen sollen, konnte er vor der Sonne nicht mehr als 28' erscheinen, was ich erkannte und von niemandem vor mir bemerkt wurde.*

Brahe hätte den Durchmesser der Blendenöffnung zum Durchmesser des Mondes hinzufügen sollen, anstatt ihn entweder unkorrigiert für seine Berechnungen zu verwenden oder den Fehler sogar noch zu verdoppeln, indem er die Sonnenbildkorrektur auf den Mond anwendete und den Blendendurchmesser ein weiteres Mal abzog. Dadurch ergaben sich Werte für die scheinbare Größe des Mondes, die deutlich zu klein ausfielen.

Versuch IV: Der Einfluss der Lochblende

Durch Variation der Blendenöffnung lässt sich ihr Einfluss auf das Lochkamerabild der teilverdeckten Sonne zeigen. Abbildung 7 vergleicht dafür die direkte Sicht auf die teilverdeckte Leuchte aus Versuch II mit Lochkamerabildern bei zunehmender Blendenöffnung. Es ist deutlich zu sehen, wie das Lochkamerabild wächst und damit der Durchmesser der Sonnensichel zunimmt, während der konkave Rand der Sonne (und damit der Rand des Mondes) kleiner wird. Der Versuch belegt eindrucksvoll, dass das Mondrätsel nicht auf astronomische Faktoren, sondern auf die Abbildungsbedingungen der Lochkamera (optische Faltung) zurückzuführen ist.

Als Brahe die scheinbare Verkleinerung des Mondes bemerkte, aktualisierte er seine Mondtabellen mit den kleineren Werten und informierte andere Astronomen über dieses Phänomen. Mindestens einer dieser Astronomen, Kepler, interpretierte Brahes Bericht als möglichen Hinweis darauf, dass der Mond tatsächlich weiter entfernt sein könnte, als es die damalige Mondtheorie vorhersagte. Dies ließ ihn vermuten, dass etwas in der astronomischen Theorie nicht korrekt sein könnte. Statt die Abweichungsfehler in den Abbildungsbedingungen der Lochkamera zu suchen, spekulierte Brahe über astronomische Ursachen für Größenschwankungen des Mondes. Später schlug er vor, die scheinbare Verkleinerung des Mondes auf die Intensität des Sonnenlichts zurückzuführen (zit. nach Straker 1981, S. 282):

> *... der Mond behält nicht denselben sichtbaren Durchmesser, den er sonst hat, sondern durch die Kraft des Sonnenlichts werden seine Grenzen verkleinert, wobei eine optische Ursache dieses Ergebnis bewirkt, so dass etwa ein Fünftel des Mondes verschwindet und sich dem Auge nicht zeigt.*

Andere Theorien besagten, dass der Mond eine transparente Atmosphäre habe, die während eines Vollmonds beleuchtet werde, aber durchscheinend werde, wenn er vor die Sonne trete (ebd.).

So seltsam diese Überlegungen aus heutiger Sicht erscheinen, müssen wir uns gleichzeitig der Schwierigkeiten bewusst sein, mit denen Astronomen bei der

[4] Michael Mästlin (1550–1631), Professor an der Universität Tübingen, war einer der wichtigsten Lehrer und Mentoren von Kepler und einer der ersten Astronomen, der die kopernikanische Theorie offen unterstützte. Unter Mästlin lernte Kepler die kopernikanische Kosmologie kennen und wurde ein überzeugter Anhänger des heliozentrischen Systems. Von Mästlin lernte Kepler wohl auch die Lochkameramethode kennen. Obwohl Mästlin sich später gegenüber einigen von Keplers Ideen skeptisch zeigte (wie den elliptischen Planetenbahnen), blieb er bis zu seinem Tod ein wichtiger Korrespondenzpartner für Kepler.

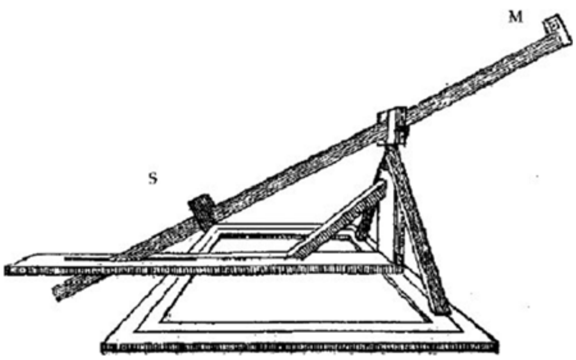

Abb. 8: Keplers Lochkamera-Instrument. Die Skizze findet sich in der späteren ‚Astronomiae pars optica' von 1604 und ist aussagekräftiger als die ursprüngliche Abbildung aus Keplers Notizbuch (Kepler 1939, S. 289).

Interpretation von Lochkamerabildern konfrontiert waren. Sie strebten nach einer umfassenden Theorie, die nicht nur instrumentelle Bedingungen wie den Einfluss der Blende berücksichtigte, sondern auch andere astronomische Faktoren und optische Beobachtungseinflüsse in Betracht zog.

Welche Effekte auf welche Ursachen zurückzuführen sind, ergibt sich aus dem Wechselspiel zwischen Beobachtung und theoretischer Deutung, d.h. aus einem Prozess, den wir im vorliegenden Fall beim Quellenstudium nachvollziehen können. Kepler selbst war sich der epistemischen Komplexität dieses Prozesses bewusst und bezeichnete Finsternisse in einem amüsanten Wortspiel als die 'Augen der Astronomen' (Kepler 2002, S. 598), um die enge Verbindung zwischen Optik und Astronomie in diesem Phänomen zu betonen. Jedenfalls war er nicht von Brahes Ideen überzeugt, da er glaubte, dass die Umlaufbahnen und Dimensionen himmlischer Körper konstant seien. Er hoffte, dass die Sonnenfinsternis, die er am 10. Juli 1600 in Graz mit einem neuen Instrument beobachten wollte, dazu beitragen würde, das Rätsel zu lösen.

3. Kepler und die Sonnenfinsternis von 1600

In einem Brief von Anfang Juli an Erzherzog Ferdinand,[5] Landesherr von Innerösterreich und Mäzen, formuliert Kepler seine Absicht, dem Mondrätsel bei der bevorstehenden Sonnenfinsternis auf die Spur zu kommen (Kepler 1949, S. 120, Brief 166):

> *...denn das Thema der Finsternisse ist äußerst aufschlussreich und verdient die sorgfältige Beachtung aller Menschen, insbesondere der Könige und Fürsten. Außerdem hoffe ich, dass mir, so Gott will, die klare Beobachtung dieser Finsternis, über die ich nachdenke, sehr bei den noch unvollkommenen Hypothesen Tychos bezüglich des Mondes helfen wird, die er jedoch bereits als sicher angenommen hat, und dass ich durch offensichtliche Experimente beweisen kann, dass sie richtig sind.*

Kepler hatte für die bevorstehende Sonnenfinsternis eigens ein Instrument konstruiert (siehe Abb. 8). Das Herzstück war eine 4 Meter lange Achse, die sich um einen festen Punkt im Azimut drehen und zusätzlich in der Höhe verstellen ließ. An dieser Achse waren Scheiben befestigt, die in spezifischen Abständen senkrecht zur Längsrichtung positioniert waren. Die obere Scheibe (M) besaß eine kreisförmige Lochblende, während die untere Scheibe (S) als Bildschirm diente.[6] Seine Notizbuchaufzeichnungen beginnt Kepler mit einer Darstellung und einem Datenblatt zu seinem Instrument.

Bereits zuvor, am 7. Juli, hatte er sich bemüht, den scheinbaren Durchmesser der Sonne mit diesem Instrument zu ermitteln – und hatte festgestellt, dass die gemessenen Werte zu groß waren. Um mögliche Beobachtungsfehler zu berücksichtigen hatte er deshalb seine Werte nach Brahes Korrekturmethode angepasst und ferner untersucht, ob die Textur des Papiers die Wahrnehmbarkeit des Sonnenbildes beeinflusst. Nachdem er eine Unstimmigkeit in der Entfernung zwischen dem Schirm und der Blende entdeckt hatte, begann die Berechnung von neuem, die neu errechneten Werte für den Sonnendurchmesser blieben immer noch zu groß.

Am 10. Juli bestimmte Kepler den scheinbaren Sonnendurchmesser erneut (Kepler 2002, S. 246):

> *Auf diese Weise ergibt sich der Sonnendurchmesser 29'30". Zuvor schien der Radius allein durch Schätzung um 2 Teile größer zu sein. Ich hatte keinen Zirkel benutzt. Tycho setzte 29'40" fest. Der Unterschied beträgt 10". Dies geschah am 10. Juli, am Tag der Finsternis.*

Nun macht sich Kepler daran, den Monddurchmesser zu bestimmen (ebd.):

> *Den Durchmesser des Mondes habe ich nur einmal gemessen, und dieser war nicht genau, sondern etwas kleiner als erwartet. Zu anderen Zeiten war das Bild zu blass. Aus drei speziell markierten Punkten am*

[5] Erzherzog Ferdinand II. von Innerösterreich (1578–1637), der spätere Kaiser Ferdinand II., war in den frühen Jahren ein Gönner und Unterstützer von Kepler. 1594 erhielt Kepler eine Anstellung als Mathematiklehrer an der Stiftschule in Graz, wo er unter anderem sein ‚Mysterium Cosmographicum' (1596) verfasste. Allerdings zwang Ferdinand II. im Rahmen der Gegenreformation 1598 alle Protestanten, entweder zum Katholizismus zu konvertieren oder Graz zu verlassen. Kepler, ein überzeugter Protestant, musste daher im September 1598 die Stadt verlassen. Er kehrte im Frühjahr 1599 nach Graz zurück, nachdem er einen Schutzbrief des Erzherzogs erhalten hatte. Aufgrund der weiteren Verschärfung der Religionspolitik musste Kepler Graz jedoch 1600 endgültig verlassen.

[6] Aus heutiger Sicht erscheint es unvorstellbar, dass die Lochkamera offen war, d.h., dass keine weiteren Maßnahmen ergriffen wurden, um den Strahlengang von dem Umgebungslicht abzuschirmen. Kepler kannte zwar etwaige Empfehlungen, aber scheint diesen hier keine Priorität eingeräumt zu haben. Lochkameras, die störende Lichteinflüsse unterdrücken, wurden erst etwas später von Balthasar Conrad (1599-1660) und Melchior Balthasar Hanel (1627-1689) konstruiert (Marek 1971, S. 141f). Wie Marek (ebd.) bemerkt, ist dies möglicherweise auch einer der Gründe, weshalb Kepler nicht die Beugung entdeckt hat, obwohl sie in Reichweite seiner experimentellen Möglichkeiten lag.

Mondumfang und drei speziell markierten Punkten am Sonnenumfang ergab sich aufgrund des Schnittwinkels und der optischen Verhältnisse der Sonnenradius deutlich, d.h. in richtiger Größe. Der Mondradius betrug 1 Fingerbreit und 26 2/3 scr oder 98 2/3. Wenn 105 1/2 [Einheiten] *29'30'' ergeben, was ergibt dann 98 2/3?*

Es folgen einige Rechnungen, die Kepler nicht zufriedenstellen. Am 12. Juli überprüft er erneut die Anordnung seines Instruments (ebd., S. 247 ff):

Am 12. Juli bei kräftigem Wind, der selten meine Wetterfahne in Ruhe ließ, richtete ich mein Instrument nach der Meridianlinie aus, um die Höhe der Sonne zu messen. Das Senklot war richtig ausgerichtet. Aber im rechten Winkel gab es zwei Seiten, die Bezug auf die Senkrechte unsicher waren. Die erste aufrechte Seite war etwas länger, etwa 5 Fuß und 10 Finger, etwa 3 Teile. Denn Diebe hoben daran.

Abermals setzt Kepler seine Berechnungen fort, sucht den Fehler in der Geometrie seines Instruments. Mitten in seinen Überlegungen taucht dann plötzlich eine unerwartete Einsicht auf (ebd., S. 249):

Da fällt mir gerade etwas ein wegen der Durchmesser der Leuchten [Sonne und Mond]*, warum der Mond in Konjunktion kleiner erscheint als in Opposition. Der Beweis geht aus der Figur klar* [Abb. 9, Anm. d. Verf.] *hervor. Ich muss mir nur noch die Reihenfolge der Probleme überlegen.*

Unmittelbar im Anschluss entwickelt Kepler eine neuartige Theorie der Camera Obscura, indem er in nummerierter Reihenfolge Sätze und Folgerungen formuliert. Zunächst werden in 17 Sätzen die Grundlagen einer allgemeineren Theorie der Lochkamera dargelegt, die anschließend in weiteren 14 Sätzen auf das Mondrätsel angewendet wird. Gleich zu Beginn formuliert er, zusammen mit dem Prinzip der geradlinigen Lichtausbreitung, die entscheidende Idee: Er betrachtet die Lichtquelle als Summe unendlich vieler Punklichtquellen (ebd.).

3. *Sowohl die Kreislinie* [hiermit meint Kepler die Kontur von Sonne und Mond, Anm. d. Verf.] *als die Kreisflache besitzt unendlich viele Punkte.*
4. *Das Licht fällt in geraden Linien vom Leuchtenden auf das Beleuchtete.*
5. *Alle Punkte eines leuchtenden Körpers senden Lichtstrahlen aus.*

Für den Fall einer punktförmigen Lichtquelle erscheint bei der Durchleuchtung ein Lichtbild der Blende auf dem Schirm (Satz 7), das mit der Blende größengleich wird, wenn die Punktlichtquelle unendlich weit entfernt ist (Satz 9). Da sowohl die Lichtquelle als auch die Blende eine Ausdehnung haben, machen sich auch beide Geometrien im Lochkamerabild bemerkbar (Sätze 10-12). Nur wenn die Blende ein Punkt wäre, ergäbe sich ein umgedrehtes, das heißt, punktgespiegeltes Bild der Lichtquelle (Satz 13, ideale Lochkamera). Vor diesem Hintergrund nennt Kepler ein Kriterium, unter welchem das

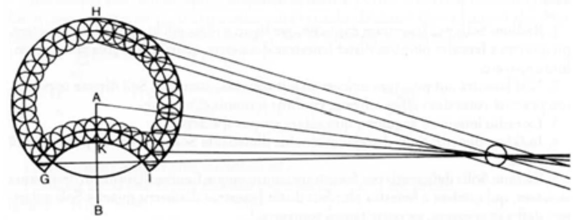

Abb. 9: Keplers Skizze aus seinem Notizbuch, welche die Auflösung des Mondrätsels veranschaulicht. Der Durchmesser des Mondes wird durch den Durchmesser der Blende verringert, so wie der Durchmesser der Sonne durch den Durchmesser der Blende vergrößert wird (aus Kepler 2002, S. 249).

Lichtbild auf dem Schirm der Tendenz nach zum Bild der Lichtquelle wird (ebd., S. 250):

14. *Ist der Abstand des Fensters vom Schirm in Vielfachen seines Durchmessers nicht kleiner als der des leuchtenden Körpers in Vielfachen seines, so weicht die Figur des Lichtbildes auf dem Schirm von der des Fensters nach der des leuchtenden Körpers hin ab.*

Die Situation der Sonnenfinsternis in Abbildung 9 erweist sich für Kepler als ein Sonderfall der zuvor skizzierten Theorie. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse und die richtige Interpretation der Finsternis werden in 14 weiteren Sätzen formuliert. An erster Stelle steht die Lösung des *Sonnentalerproblems*, d.h., unter welchen Bedingungen das Sonnenlicht, das durch eine beliebig geformte Blende auf einen Schirm fällt, eine Kreisform annimmt (Satz 1). Dieselben Bedingungen sind auch während der Sonnenfinsternis und in der Lochkamera wirksam. Ein scharfes Bild der Sonne entsteht nur, wenn die Blende punktförmig ist. Nach und nach entfaltet Kepler vor dem Hintergrund seiner skizzierten Lochkameratheorie die Lösung des Mondrätsels und gibt Erklärungen für eine Reihe von rätselhaften Details. Zum Beispiel erklärt er, weshalb die Hörner der Sonnensichel im Lochkamerabild abgerundet erscheinen, während sie in der direkten Ansicht spitz sind, oder weshalb der Übergang von der partiellen zur totalen Finsternis auf dem Lochkameraschirm nicht stetig wie am Himmel, sondern sprunghaft erfolgt (ebd.):

7. *Wenn das Fenster rund ist, erweitert sich das gesamte Bild des leuchtenden Teils, indem die Ränder um einen Fensterradius in alle Richtungen verschoben werden. Daher erscheinen die Hörner des leuchtenden Teils der Sonne im Lichtbild nicht scharf, wie am Himmel, sondern stumpf, entsprechend der Breite des Fensters.*

[...]

12. *Wenn der Kreis um die Sonne verschwindet, entspricht er im Bild dem Durchmesser des Fensters. Und wenn die Sonne vollständig verfinstert ist, geschieht dies im Lichtbild plötzlich, nicht allmählich wie am Himmel.*

Dies ist Keplers Lösung des Rätsels der scheinbaren Verkleinerung des Monddurchmessers bei Sonnenfinsternissen: Der Mond wird nicht kleiner, sondern das Bild der leuchtenden Sonne vergrößert sich auf Kosten des Mondbildes. Bei einer unendlich weit entfernten Sonne und einem kreisförmigen Fenster vergrößert sich das Sonnenbild entlang des gesamten Randes der Sonnensichel um den Radius der Blende. Im gleichen Maße, wie das helle Lochkamerabild der Sonne um den Durchmesser der Blende wächst, schrumpft der verdunkelnde Teil des Mondes um den gleichen Durchmesser. Damit ergibt sich sofort die Lösung zur Berechnung der scheinbaren Durchmesser: Der Radius des konkaven Bogens der teilverdeckten Sonne im Lochkamerabild muss durch Hinzufügen des Blendendurchmessers korrigiert werden. Kepler beginnt erneut zu rechnen und kommt bereits nach wenigen Zeilen zum Ergebnis (ebd., S. 251): *Das Verhältnis von Sonnendurchmesser zu Monddurchmesser beträgt etwa 10 zu 11.*

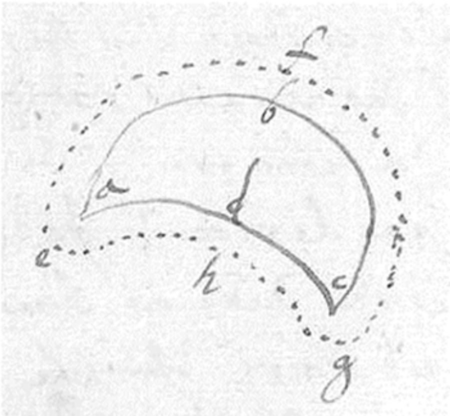

Abb. 10: Originalskizze zur Lösung des Mondrätsel von Kepler aus seinem Brief an Mästlin vom 9. September 1600 (aus Kepler 1949, S. 151).

Am 9. September 1600 informiert Kepler seinen Freund und ehemaligen Lehrer Mästlin über seine Entdeckung, bei der wir auch erfahren, dass Kepler Opfer eines Diebstahls geworden war (Kepler 1949, Brief 175, S. 150):

> *In der Zwischenzeit war ich ganz damit beschäftigt, Sonnenfinsternisse zu berechnen und zu beobachten. Während ich damit beschäftigt war, ein spezielles Instrument herzustellen und eine Bühne im Freien zu bauen, nutzte ein anderer die Gelegenheit, um Dunkelheit zu erforschen, und verursachte keinen Sonnenfehler, sondern einen Fehler im Geldbeutel, indem er dreißig Gulden entwendete. Ein teurer Fehler, wahrhaftig, aber seitdem habe ich gelernt, warum der Neumond bei einer Sonnenfinsternis einen so kleinen Durchmesser zeigt. Daher schrieb ich im restlichen Juli eine Ergänzung zum sechsten Buch der Optik von Vitellio.*

Kepler findet nicht nur eine adäquate Lösung des Mondrätsels, sondern legt in seinen Tagebuchaufzeichnungen auch eine verallgemeinerte Theorie der Lochkamera vor, die im Rahmen der geometrischen Optik auch heute noch unverändert Gültigkeit besitzt. Damit haben wir hier ein wissenschaftshistorisches Zeugnis vor uns, das nicht nur Keplers Fähigkeit illustriert, komplexe Zusammenhänge intuitiv zu erfassen, sondern zugleich auch die Anfänge der moderneren Optik dokumentiert. Schlichting (1995, S. 204) spricht sogar von einer 'konzeptuellen Revolution' im Sinne Thomas S. Kuhn.

Gleichzeitig ist das Auftreten von Theorien ex nihilo, also das vermeintliche Entstehen von geistesblitzartigen Erkenntnissen, stets kritisch zu hinterfragen. Allzu leicht verfällt man in den Duktus der Erzählung einer Heldengeschichte bzw. leistet einer 'Quasi-Geschichte' Vorschub (Whitaker 1979a, 1979b). Auch Kepler war in ein wissenschaftssoziologisches Gefüge eingebettet: Er stand zu vielen astronomischen Themen, auch zum Mondrätsel, in regem Briefaustausch mit Astronomen wie Mästlin oder dem Gelehrten und Diplomaten Herwart von Hohenburg.[7] Im Februar 1600 besuchte Kepler Tycho Brahe in Prag, was den Beginn einer wichtigen wissenschaftlichen Zusammenarbeit markierte. Dort hatte Kepler wahrscheinlich die Korrekturmethode für das Lochkamerabild der Sonne kennengelernt; möglicherweise auch eine geometrische Begründung dafür (Straker 1981). Glaubt man Kepler selbst, hatte ihn das Studium der Lochkameratheorie von John Pecham bei der Lösung des Mondrätsels nicht weitergebracht, und er suchte die Antwort in einem gegenständlichen Modell. Rückblickend schreibt er in seiner *Ad Vitellionem* (Kepler 2008, S. 84):

> *Mir ist vor mehreren Jahren aus den Pisanischen* [gemeint ist John Pecham, Anm. d. Verf.] *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 αυτοψιαν [eigenen Anschauung] in der Körperlichkeit.*

Und weiter heißt es:

> *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 hinabgelassen und derart auf 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*

[7] Herwart von Hohenburg (1553–1622), ein hoher Beamter und Diplomat am Hofe Kaiser Rudolfs II., war ein bedeutender Förderer der Wissenschaften und insbesondere der astronomischen Forschungen Keplers. Als Mäzen und Korrespondent unterstützte Herwart Keplers Arbeit sowohl finanziell als auch intellektuell und trug maßgeblich zur Verbreitung von Keplers revolutionären Ideen bei.

zeichnete die Reihe zahlloser zarter Abbildungen des Lochs die große 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 vollendetste Figur ist, sondern weil dies im allgemeinen die Form des leuchtenden Körpers ist. Dieses ist in der vorliegenden Arbeit der erste Erfolg.

Ob Kepler tatsächlich mit einem physischen Modell experimentierte oder ob er die Vergegenständlichung geometrischer Überlegungen lediglich aus didaktischen Gründen verwendete, bleibt offen. In jedem Fall scheint in den Tagen nach der Sonnenfinsternis im Jahr 1600 eine derartige Auseinandersetzung stattgefunden zu haben. Dafür spricht, dass die im Notizbuch notierten Sätze und Folgerungen schon von ihrer Struktur her Ausdruck gereifter Gedanken sind.

Im Jahr 1604 veröffentlichte Kepler seine ‚Paralipomena ad Vitellionem', in der er seine Lochkameratheorie der gelehrten Welt vorstellte.

4. Keplers Lichtfiguren

Im zweiten Kapitel der *Paralipomena*, das als Teil der astronomischen Abhandlung *Astronomiae Pars Optica* erschien, diskutiert Kepler das Konzept der 'Lichtfiguren', das eine verallgemeinerte Theorie der Lochkamera enthält. Viele der in seinem Notizbuch formulierten Sätze finden sich hier wieder, teilweise ausführlicher und in der Struktur aus „Satz und Beweis" mathematisch dargestellt.

Im Kern präsentiert Kepler hier ein allgemeines geometrisches Konstruktionsprinzip zur Beschreibung der Genese von Schattenbildern ausgedehnter Blendenöffnungen in der Beleuchtung ausgedehnter Leuchten. Das Lochkamerabild bildet den einen Spezialfall dieser Anordnung, bei dem die beleuchtete Öffnung sehr klein wird; der scharfe Schattenriss der Öffnungsblende in der Beleuchtung einer quasi ausdehnungslosen Leuchte den anderen. Das Konstruktionsprinzip wird in Abbildung 11 verdeutlicht. Kepler verwendet eine asymmetrische Dreiecksform als Lichtquelle und ein quadratisches Fenster als Blende.

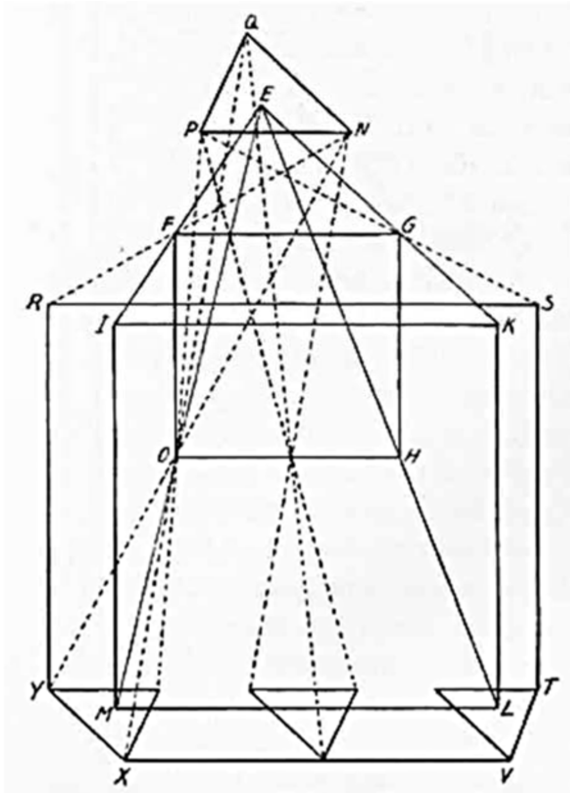

Abb. 11: Keplers Darstellung zur Erläuterung der Erzeugung des Lochkamerabildes: Das Dreieck PNQ symbolisiert eine leuchtende Fläche mit Zentrum E, während das Rechteck FGHO eine Blende ist. Jeder Punkt entlang seines Umfangs erzeugt ein invertiertes Bild der Lichtquelle. Die Ansammlung dieser invertierten Bilder von PNQ bildet die Umrisse des Lochkamerabildes RSTVXY. Man könnte sich dies vorstellen, indem man das Projektionszentrum entlang des Fensterrands zum Punkt O verschiebt und dadurch eine Reihe von Lochkamerabildern über dem klaren Bild IKLM des Fensters nachzeichnet (aus Kepler 2008, S. 91)

Die 'Lichtfigur' auf dem Schirm im Vordergrund entsteht, indem die Blende als Summe punktförmiger Öffnungen betrachtet wird. Jeder Punkt entlang des Blendenrandes erzeugt ein punktsymmetrisch gespiegeltes Bild der beleuchteten Lichtquelle. Die resultierende 'Lichtfigur' (Lochkamerabild) entsteht auf diese

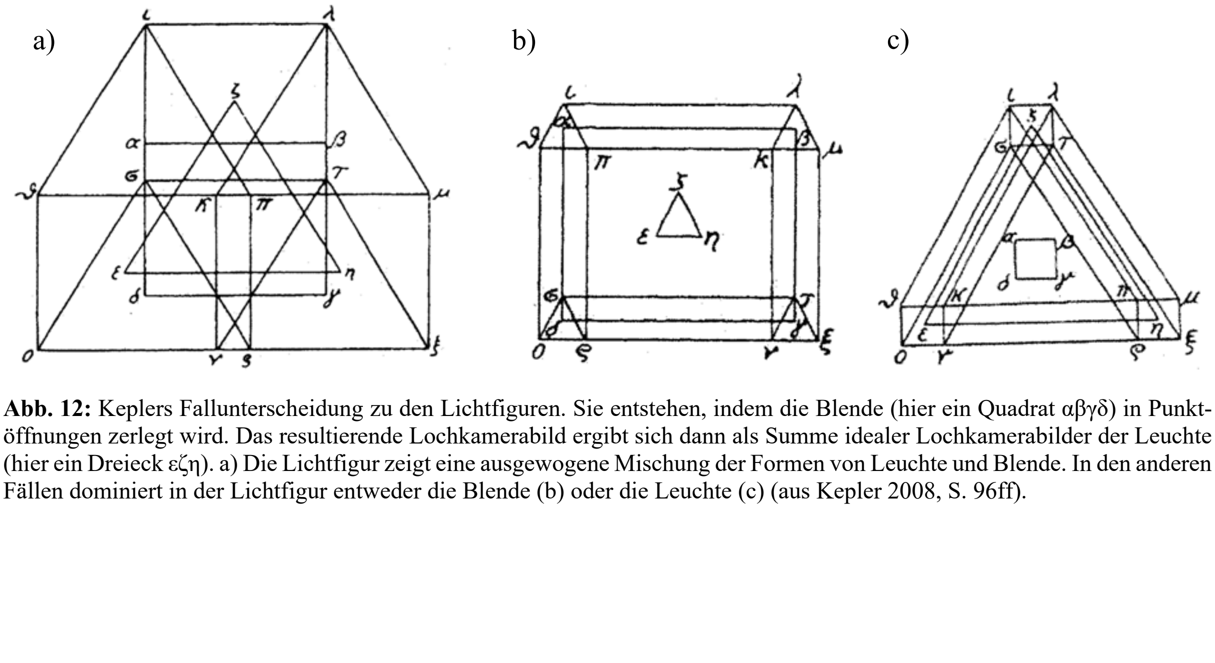

Abb. 12: Keplers Fallunterscheidung zu den Lichtfiguren. Sie entstehen, indem die Blende (hier ein Quadrat αβγδ) in Punktöffnungen zerlegt wird. Das resultierende Lochkamerabild ergibt sich dann als Summe idealer Lochkamerabilder der Leuchte (hier ein Dreieck εζη). a) Die Lichtfigur zeigt eine ausgewogene Mischung der Formen von Leuchte und Blende. In den anderen Fällen dominiert in der Lichtfigur entweder die Blende (b) oder die Leuchte (c) (aus Kepler 2008, S. 96ff).

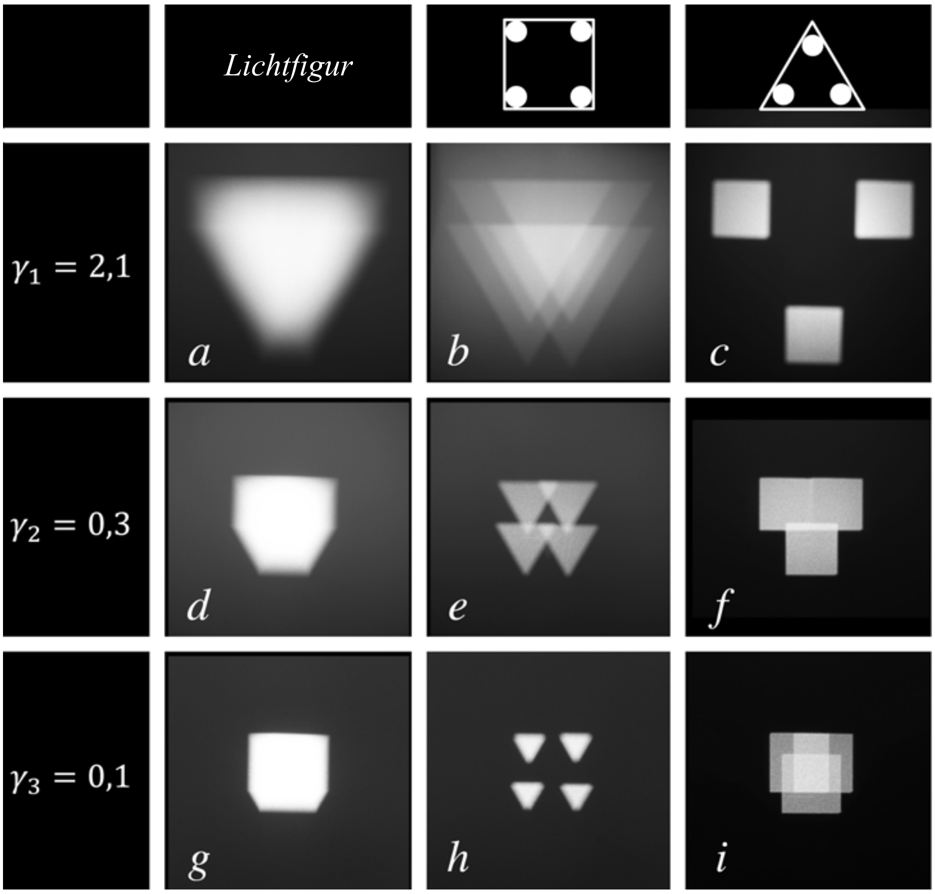

Abb. 13: Die Matrix zeigt die Lichtfiguren nach Kepler für verschiedene Abstandsverhältnisse. Es gilt $\gamma = d_1/d_2$, wobei d_1 und d_2 die Abstände zwischen Leuchte und Blende bzw. Blende und Schirm bezeichnen (vgl. Abb. 5). Je näher die Blende zum Schirm hin verschoben wird, desto stärker bringt sich im resultierenden Schattenbild die Blendengeometrie zur Geltung (Spalte 2). Spalte 3 und 4 veranschaulichen die beiden Konzeptualisierungsmethoden allgemeiner Lochkamerabilder: zum einen als Summe der Lochkamerabilder der Leuchte in Spalte 3, zum anderen als Summe der Blendenprojektionen in Spalte 4.

Weise als Gesamtheit idealer Lochkamerabilder der Lichtquelle, die durch die Blende vermittelt werden. Kepler schreibt (Kepler 2008, S. 91):

> *Die Lichtfigur an der Wand wird gemeinschaftlich erzeugt aus der umgekehrten Figur der leuchtenden Fläche und der aufrechten des Fensters und entspricht ihnen dem Aussehen nach auf diese Weise.*

Welche der beiden Geometrien, die der Lichtquelle oder die der Blende im resultierenden Schattenbild dominiert, hängt nun davon ab, wie das Größenverhältnis der Projektionen beider auf den Schirm beschaffen ist. Abbildung 12 zeigt die maßgebliche Fallunterscheidung: Ist das ideale Lochkamerabild der dreieckigen Leuchte εζη auf dem Schirm in etwa so groß wie die Projektion der Blende αβγδ, wobei das Projektionszentrum im Schwerpunkt der Leuchte liegt, dann (ebd., S. 97)

> *sieht man sowohl die schrägen Seiten des Dreiecks wie die geraden des Quadrats in dem Umfang der ganzen Figur fast gleichgroß hervortreten, ...*

Das Lochkamerabild zeigt eine ausgewogene Mischung aus Leuchten- und Blendengeometrie, sodass eine eindeutige Zuschreibung, welche der beiden Formen in der Lichtfigur vorherrscht, nicht möglich ist. Das Gleichgewicht dieser Mischung weist zugleich auf die beiden anderen Fälle hin, in denen die Geometrie der einen zugunsten der anderen zurücktritt. Ist die Projektion der Blendenöffnung auf dem Schirm deutlich größer als das Lochkamerabild der Lichtquelle, dann fehlt dem resultierendem Lochkamerabild (ebd., S. 98)

> *nur ganz wenig, um dem vollkommenen Fenster ähnlich zu sein. Die Spuren von der leuchtenden Fläche sind aber sehr klein.*

Andererseits kehren sich die Bedingungen gerade um, wenn die Projektion der Blende sehr klein gegenüber dem Bild der Leuchte wird. Nun (ebd.)

> *fehlt der Figur nur ganz wenig, um ihren Ursprung, nämlich die leuchtende Fläche, in umgekehrter Lage darzustellen.*

Durch diese Fallunterscheidung erfasst Kepler das gesamte Spektrum möglicher Schattenbilder als Mischbilder der Geometrien von Leuchte und Öffnungsblende und formuliert Kriterien, die es ermöglichen, zu bestimmen, welche Geometrie in der Lichtfigur dominiert. Der damit formulierte Zusammenhang zwischen abbildenden und abgebildeten Elementen stellt ein bis heute gültiges grafisches

Verfahren zur Darstellung des Prinzips der *optischen Faltung* dar.

Versuch V: Keplers Lichtfiguren I

Um das Konstruktionsprinzip im Unterricht verständlicher zu machen, wandeln wir den Versuchsaufbau aus Abbildung 5 ab. Wir verwenden, wie Kepler, eine dreieckige Lichtquelle und eine quadratische Blende. Die Abmessungen von Blende und Lichtquelle sind gerade so gewählt, dass alle drei in Abbildung 12 dargestellten Fälle, d.h. der Übergang vom Blendenbild zum Leuchtenbild, realisiert werden können (siehe Abb. 13, a, d, g). Mithilfe einer kleinen Testblende (3 Spalte, oben), bei der die durchbohrten Ecken als nahezu ideale Punktlochblenden wirken, erzeugen wir Lochkamerabilder der Lichtquelle (b, e, h). Es wird deutlich, wie man sich die resultierende Lichtfigur als Summe der über den Blendenrand geführten umgedrehten Lochkamerabilder der Leuchte denken kann.

Versuch VI: Keplers Lichtfiguren II

Interessanter Weise behandelt Kepler indirekt ein zweites, geometrisch äquivalentes Konstruktionsprinzip, ohne es im Detail auszuführen. Bei diesem Ansatz wird die Leuchte in gedachte Punktlichtquellen zerlegt und das resultierende Lochkamerabild auf dem Schirm entsteht als Summation der Blendenprojektionen auf dem Schirm. Mit einer zweiten Testblende vor der Leuchte (Spalte 4, oben) erzeugen wir drei Projektionen der quadratischen Öffnungsblende. Der Umriss dieser Konturen ergibt abermals die Lichtfigur.

Und das Mondrätsel? Das Rätsel bildet gewissermaßen die Klammer in Keplers Kapitel über die Lichtfiguren. So schreibt er zu Beginn (ebd., S. 85):

> *Denn so viele Finsternisse auch nach dieser Methode* [Lochkamerامethode, Anm. d. Verf.] *beobachtet worden sind, alle zeigten am Himmel einen größeren Umfang, als wie er an dem Lichtkegel erschien, alle zeigten am Himmel einen größeren Durchmessers des Mondes als an dem Lichtkegel. Daher kam es, daß sich jener Phönix unter den Astronomen, Tycho Brahe, im Drang dieser Schwierigkeiten bewundernswert erwies, indem er verkündete, daß sich der Monddurchmesser bei den Konjunktionen stets um den fünften Teil kleiner erweise, als er in den Oppositionen erscheint, obwohl er in beiden Fällen gleich weit von uns entfernt sei.*

Am Ende des Kapitels diskutiert Kepler die uns schon bekannte Lösung des Mondrätsels. Reagieren konnte Brahe nicht mehr: Er starb im Oktober 1601; Kepler übernahm seine Stelle als kaiserlicher Mathematiker und Astronom am Hof von Kaiser Rudolf II in Prag.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag haben wir die Entwicklung der Lochkameratheorie nach Kepler anhand von originalen Quellen nachvollzogen. Die alte Frage zur Entstehung der Sonnentaler war zunächst vor allem akademischer Natur. Erst als die Lochkamera zu einem festen Beobachtungsinstrument in der Astronomie wurde, führte das Fehlen einer Abbildungstheorie der Lochkamera zu ernsthaften Schwierigkeiten bei der Deutung astronomischer Daten. Die von Brahe vorgeschlagene Interpretation des Mondrätsels stellte einige von Kepler als sicher angenommene Bedingungen der Himmelsmechanik in Frage. Kepler, der in erster Linie Astronom war und dem optische Erkenntnisse vor allem zur richtigen Interpretation astronomischer Beobachtungen dienten, muss einen erheblichen Erkenntnisdruck verspürt haben, vielleicht auch persönliche Rivalität gegenüber Brahe.[8] Die hier vorgestellte historische Kontextualisierung kann vor diesem Hintergrund und aufgrund des hervorragenden Quellenmaterials verschiedene Anknüpfungspunkte bieten, zum Beispiel in der Vermittlung von Aspekten der ‚Natur der Naturwissenschaft' (McComas 2002) oder im Bereich des ‚Storytelling' (Heering 2013).

Wie das Beispiel von Kepler und Brahe verdeutlicht, ist naturwissenschaftliches Wissen von historischen, kulturellen und sozialen Faktoren beeinflusst. Die Forschung umfasst subjektive Aspekte, die sich zum Beispiel zeigen, wenn Brahe den verkleinerten Monddurchmesser ohne klare oder nachvollziehbare Begründung in seinem Sinne interpretiert. Zudem ist Forschung eine kreative Tätigkeit, die sich keineswegs einer starren Schritt-für-Schritt-Methode unterordnet. Dies zeigt sich unter anderem in Keplers Aufzeichnungen, aus denen hervorgeht, dass die Entwicklung seiner Lochkamerامethode nicht auf einer methodischen Anleitung basierte, sondern vielmehr Elemente von Intuition und Zufall beinhaltet. Aus diesem Grund könnte das Mondrätsel auch gut geeignet sein, um im Rahmen des Storytelling-Ansatzes als Geschichte gestaltet zu werden. Dies würde es ermöglichen, ein weiteres authentisches Beispiel zu schaffen, das ein angemessenes Bild der Naturwissenschaften, ihrer Methoden, ihrer Erkenntnisgewinnung und ihrer Diskurse vermittelt.

Aus fachlicher Perspektive bietet das Mondrätsel Anknüpfungspunkte, um eine allgemeinere Theorie der Lochkamera im Unterricht zu thematisieren. Häufig bleibt die Diskussion auf den Fall der idealen Lochkamera beschränkt. Abweichungen von der punktförmigen Blende, hervorgerufen durch Blenden mit endlicher Größe, werden dann – bereits aus einer technischeren Perspektive – als Fehler der Bilderzeugung thematisiert. Keplers Konstruktionsprinzip der Licht-

[8] Die Rivalität zwischen Johannes Kepler und Tycho Brahe ist ein faszinierendes und gut dokumentiertes Kapitel in der Geschichte der Astronomie. Obwohl beide Männer letztendlich zum Fortschritt der Himmelswissenschaften beitrugen, waren ihre Beziehungen durch eine Mischung aus Bewunderung und Wettbewerb gekennzeichnet. Als sie 1600 in Prag zusammenkamen, wurde Kepler Brahes Assistent.

figuren zeigt, wie sich verallgemeinerte Lochkamerabilder in das Wechselspiel von Abbilden und Abgebildetwerden der Leuchten- und Blendengeometrie einfügen, das sich ganz allgemein für Schattenbilder formulieren lässt (Grebe-Ellis & Quick 2023). Die Lösung des Mondrätsels erweist sich aus dieser Perspektive als Spezialfall der optischen Faltung.

6. Literatur

Aristoteles (1991): *Problemata Physica*. Flasher, H. (Übers.), Berlin: Akademie Verlag

Belting, H. (2008): *Florenz und Bagdad. Eine west-östliche Geschichte des Blicks*. München: C.H. Beck.

Brahe T. (1913): *Opera Omnia,* Vol XII, Dreyer, J. L. E. (Hrsg.), Hauniae: Libraria Gyldendaliana

Christianson J. (2020): *Tycho Brahe and the measure of the heavens.* London: Reaktion Books

Ehtreiber J. Hohenester A. Rath G. (1994): *Der kosmische Träumer. Johannes Kepler - die andere Seite.* Graz: Leykam

Grebe-Ellis, J. (2010): Schattenbilder wie Schriftzeichen lesen. Eine bildoptische Studie nach Johannes Kepler, *PhyDid* A 9 34–44

Grebe-Ellis J. & Quick T. (2023): Soft shadow images. *Eur. J. Phys*. 44 045301

Heering, P. (2013): Storytelling als Zugang zur Bildung in den Naturwissenschaften. *Phydid B*. Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG Frühjahrstagung 2013 in Jena, 1-7

Kepler J. (1939): *Astronomiae pars optica*. Gesammelte Werke 2. Hammer, J. & Caspar, M. (Hrsg.), München: C.H. Beck

Kepler J. (1949): *Briefe 1599-1603*. Gesammelte Werke 14. Casper, M. & Dyck, W. von (Hrsg.), München: C.H. Beck

Kepler J. (2002): *Manuscripta astronomica (III)* Gesammelte Werke 21.1. Bialas, V., Boockmann, F., Dyck, W. von, Knobloch, E., Casper, M. (Hrsg.), München: C.H. Beck

Kepler J. (2008): *Schriften zur Optik: 1604-1611*, Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften: 198, Frankfurt a. M.: Verlag Harri Deutsch

Lindberg D. C. (1968): The Theory of Pinhole Images from Antiquity to the Thirteenth Century, *Arch. Hist. Exact Sci.* 15: 154-176

Marek J. (1971): Ansätze zu Youngs und Fresnels Versuchen bei Kepler: Die Rolle der Lochkamera in der Entwicklung der physikalischen Optik, In: *Sudhoffs Archiv*, 55/2, 136-155

McComas W. F. (2002): *The Nature of Science in Science Education: Rationales and Strategies*, Dordrecht: Springer Verlag

Schlichting H. J. (1995). Sonnentaler fallen nicht vom Himmel. *MNU*, 48/4, 199-204

Schlichting H. J. (2021): Der Vater der modernen Optik. *Spektrum*, 12, 60–62

Straker S. (1981): Kepler, Tycho, and the 'Optical Part of Astronomy': the Genesis of Kepler's Theory of Pinhole Image. *Arch. Hist. Exact Sci.* 24, 267-293

Whitaker M. A. B. (1979a): History and quasi-history in physics education – Part I. *Phys. Educ.*,14, 108–112

Whitaker, M. A. B. (1979b): History and quasi-history in physics education – Part 2. *Phys. Educ.*, 14, 239–242