

„Viele Wege führen nach Rom“

Alternative Ansätze zur Begründung des begrenzten Auflösungsvermögens astronomischer Instrumente

(In Bezug auf die Brennpunktmeldung „Radioteleskop Spektr-R im All“ in »Sterne und Weltraum« 10/2011)

Daniel Ahrens

Vor wenigen Monaten hat der erfolgreiche Start eines russischen weltraumgestützten Radioteleskops *Spektr-R* eine neue Ära hinsichtlich der Schärfe radioastronomischer Aufnahmen eingeläutet (vgl. Brennpunkt „Radioteleskop Spektr-R im All“ in SuW 10/2011).

Bei der Zusammenschaltung mit irdischen Radioteleskopen zu einem Interferometer werden durch die starke Elliptizität der Umlaufbahn des Teleskops extrem große Basislängen erreicht, was eine bislang unerreichte Auflösung ermöglicht.

In der gymnasialen Oberstufe wird im Physikunterricht das begrenzte Auflösungsvermögen optischer Instrumente behandelt. Alle mir bekannten Schulbücher argumentieren über den Intensitätsverlauf des Interferenzbildes zweier Beugungsscheibchen, die entweder gerade noch oder eben nicht mehr zu unterscheiden sind; z.B.: Grehn/Krause (Hg.): „Metzler Physik“. Der vorliegende Unterrichtsvorschlag möchte die Schülerinnen und Schüler (SuS) der Oberstufe mit zwei alternativen Begründungen/Herleitungen für das begrenzte Auflösungsvermögen bekannt machen. So werden zwar keine wirklich neuen physikalischen Inhalte, sehr wohl aber Neues gelernt.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Physik	Wellenoptik	Fermatsches Prinzip, Elementarbündel
Astronomie	Astropraxis	3 unterschiedliche Begründungen für das begrenzte Auflösungsvermögen astronomischer Geräte
Fächer- verknüpfung	Physik-Philosophie	Wissenschaftstheorie, Wesen physikalischer Gesetze, Kausalität
Lehre allgemein	Lehr-/Sozialformen	Selbstständige Erarbeitung anspruchsvoller Texte

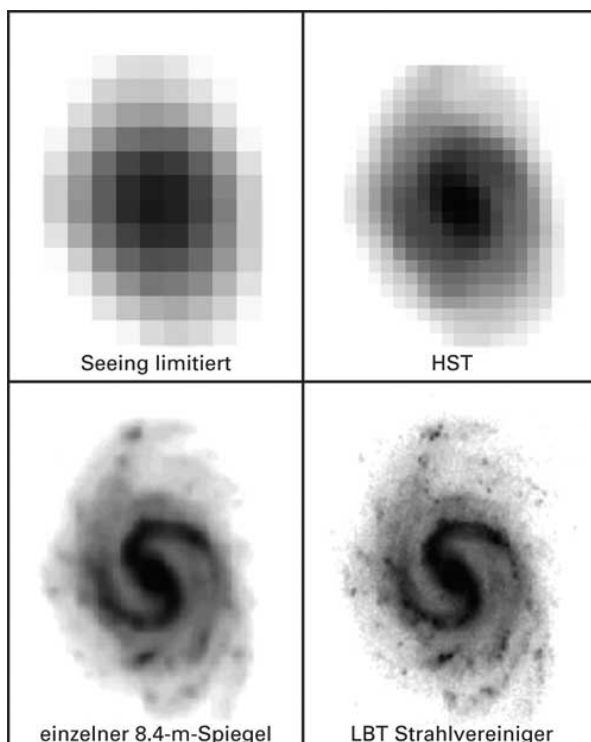


Abbildung 1: Simulation der Beobachtung einer fernen Galaxie. Sie zeigt, welche Verbesserungen in der Bildqualität man vom Large Binocular Telescope (LBT) im Vergleich zu atmosphärisch gestörten (seeing-limitierten) Beobachtungen und Hubble-Beobachtungen erwartet. (Quelle: http://www.mpifr-bonn.mpg.de/public/pr/Vergleich_500.jpg)

I. Einleitung

Die Bedeutung des Auflösungsvermögens für die beobachtende Astronomie kann gar nicht überschätzt werden. Grenzen astronomischer Aufnahmen (ganz gleich in welchem Bereich des elektromagnetischen Spektrums beobachtet wurde) liegen nur selten darin begründet, dass Detektoren nicht empfindlich genug wären, als vielmehr darin, dass die Begrenzung des Strahlungsbündels die Schärfe der Abbildung deutlich reduziert. Das ist insbesondere für die Radioastronomie ein Problem, die ja – verglichen mit optischen Teleskopen – bei sehr großen Wellenlängen beobachtet.

Um das detektierte Strahlenbündel möglichst groß (und damit die Beugungseffekte möglichst klein) zu machen, werden seit längerem Radioteleskope zu Interferometern miteinander verbunden. Diese Zusammenschaltung verhält sich dann „auflösungsmäßig“ wie ein Teleskop, dessen Öffnung so groß ist wie der Abstand (die Basislänge) der an der Zusammenschaltung beteiligten Teleskope (wenngleich die Ausbeute an Strahlung natürlich keineswegs einem solchen Riesen-Teleskop entspricht). Bislang waren die Basislängen solcher Interferometer durch den Erddurchmesser begrenzt. Die erfolgreiche russische Mission vom 18. 07. 2011 eröffnet nun völlig neue Perspektiven. Die Zusammenschaltung des Weltraumradioteleskops *Spektr-R* mit irdischen Instrumenten ermöglicht eine Basislänge von bis zu 350.000 km. Damit ist eine Auflösung möglich, die einige tausend Mal besser ist als die des Weltraumteleskops *Hubble*.

Im Rahmen des Oberstufenunterrichts gehört die Behandlung des begrenzten Auflösungsvermögens optischer Instrumente zur Obligatorik. Dabei wird in allen gängigen Lehrbüchern der gleiche Weg beschritten: Die begrenzende und damit beugende Öffnung eines jeden Instruments entwirft von Objektpunkten Beugungsscheibchen, die u. U. ineinander übergehen und nicht mehr getrennt wahrnehmbar sind.

Im vorliegenden Text werden zwei Alternativen auf dem Weg zum qualitativen und quantitativen Verständnis des begrenzten Auflösungsvermögens aller beobachtenden Instrumente (unabhängig von der beteiligten Wellenlänge) vorgestellt. Dabei kommt dem methodischen Angang eine besondere Bedeutung zu.

II. Zwei ungewöhnliche Begründungen für das begrenzte Auflösungsvermögen astronomischer Instrumente

a) Fermatsches Prinzip (R.P. Feynman)

Im vorliegenden Textausschnitt aus der deutschen Übersetzung der berühmten *Feynman lectures on physics*¹ präsentiert der Autor überraschend bereits auf der vierten Seite seines Optik-Kapitels das Fermatsche Prinzip. Das von Fermat 1650 gefundene Prinzip besagt, dass das Licht von allen möglichen Wegen, die es nehmen könnte, um von einem Punkt zu einem anderen zu gelangen, denjenigen nimmt, bei dem es diesen Punkt am schnellsten erreicht. Feynman zeigt, dass dieses Prinzip die geradlinige Ausbreitung von Licht, das Reflexions- sowie das Brechungsgesetz erklärt. Anschließend wendet er das Fermatsche Prinzip auf unterschiedliche optische Problemstellungen an (jedes Mal hält es stand), bevor er das Kapitel mit philosophischen Überlegungen und einem Ausblick in den quantenmechanischen Begründungszusammenhang des Fermatschen Prinzips beschließt.

Im Text, der den SuS ausgehändigt werden soll, folgt nun noch eine kurze Einführung in die geometrische Optik sowie Feynmans Ausführungen zum begrenzten Auflösungsvermögen optischer Instrumente.

¹ Feynman, R.P.(1991): Vorlesungen über Physik. Band I: Mechanik, Strahlung, Wärme. München: Oldenbourg.

b) Informationstheorie (W. Martienssen)

Der Textausschnitt von Werner Martienssen stammt aus unterschiedlichen Kapiteln seines Lehrbuchs *Einführung in die Physik IV – Schwingungen, Wellen, Quanten*². Zunächst werden Wellen als Nachrichtenträger vorgestellt. Es folgen veranschaulichende Beispiele sowie das Kapitel *Geometrie eines Lichtbündels*. Hier werden die SuS mit den Grundbegriffen der professionellen geometrischen Optik bekannt gemacht (Lichtbündel, Bündelquerschnitt, Raumwinkel etc.). Nun folgt das für den vorgeschlagenen Unterricht entscheidende Kapitel: *Informationsübertragung bei der optischen Abbildung*. Die Gegenüberstellung von Informationsübertragung bei Rundfunk/Fernsehen und optischen Abbildungen legt die Vermutung nahe, dass „die Nachrichten-Aufnahme- und Übertragungsfähigkeit des Trägers bei der optischen Abbildung in ähnlicher Weise begrenzt ist, wie es für die Übertragung zeitlicher Signale der Fall ist“³. Martienssen arbeitet heraus, dass die räumliche Information gequantelt und durch das Produkt aus der in Wellenlängen gemessenen Fläche der Objektstruktur und dem räumlichen Öffnungswinkel des Bündels gegeben ist.⁴ Es existiert also zu jeder Wellenlänge ein Bündel mit kleinstmöglichen räumlichen Ausmessungen, das Martienssen *räumliches Elementarbündel* nennt und auf dem seine nachfolgende Argumentation aufbaut.

Alles in Allem ein zunächst ungewohnter Ansatz, den der Autor aber auf den folgenden Seiten begründet und erläutert. Um das begrenzte Auflösungsvermögen bei optischen Abbildungen zu verstehen, argumentiert Martienssen damit, dass ein räumliches Elementarbündel – außer der Tatsache, dass es am gegebenen Ort vorhanden ist – keine zusätzliche Information transportieren kann. So zeigt ein auf dem Schirm aufgefangenes Elementarbündel lediglich an, dass unter einem gegebenen Neigungswinkel objektseitig ein Elementarbündel gegebener Strahlungsleistung vorhanden ist.⁵ In der Auffassung Martienssens besteht das von einem Linsensystem entworfene Bild eines Gegenstandes also aus einer großen Zahl nebeneinander liegender Bildflecken, die unabhängig voneinander durch räumliche Elementarbündel entstehen. Entscheidend ist, dass die Größe dieser Bildflecken nicht durch das Linsensystem, sondern ausschließlich durch den begrenzten Raumwinkel des Lichtbündels bestimmt wird⁶. Dieses Phänomen begrenzt letztendlich das Auflösungsvermögen aller Geräte, die einen Ausschnitt eines elektromagnetischen Wellenfeldes detektieren.

III. Einsatz im Physikunterricht der Oberstufe

a) Voraussetzungen

Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente wird üblicherweise im Rahmen einer Unterrichtseinheit zum Thema „Licht als Welle“ im Physikunterricht der Oberstufe behandelt. Um die „klassische“ Begründung für das begrenzte Auflösungsvermögen astronomischer Geräte (egal welcher Wellenlänge des elektromagnetischen Spektrums sie sich bedienen) erarbeiten zu können, müssen grundsätzliche Eigenschaften von (mechanischen und elektromagnetischen) Wellen und die daraus resultierenden Phänomene, insbesondere Interferenz und Beugung (speziell am Einzelspalt) qualitativ und quantitativ behandelt worden sein.

² Martienssen, W. (1984): Einführung in die Physik IV. Schwingungen, Wellen, Quanten. Wiesbaden: Aulis.

³ Martienssen, W. (1984): Einführung in die Physik IV. Schwingungen, Wellen, Quanten. S. 653.

⁴ Vgl.: Martienssen, W. (1984): Einführung in die Physik IV. Schwingungen, Wellen, Quanten. S. 654.

⁵ Vgl.: Martienssen, W. (1984): Einführung in die Physik IV. Schwingungen, Wellen, Quanten. S. 656 f.

⁶ Vgl.: Martienssen, W. (1984): Einführung in die Physik IV. Schwingungen, Wellen, Quanten. S. 658.

b) Unterrichtsvorschlag

Der „klassische“ Ansatz zur Begründung des begrenzten Auflösungsvermögens astronomischer Instrumente			
Phase	Thema	Sozialform	Zeitaufwand
1	Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente auf traditionellem Wege	Klassenunterricht o. ä.	Einzelstunde

Alternative Ansätze zur Begründung des begrenzten Auflösungsvermögens astronomischer Instrumente			
Phase	Thema	Sozialform	Zeitaufwand
2	Einstieg in die Lektüre der Texte	Einzelarbeit / Partnerarbeit	Einzelstunde
3	Intensives Textstudium	Einzelarbeit	Hausaufgabe
4	Auswertung	Partnerarbeit / Klasse	Doppelstunde

Kommentare zu den einzelnen Phasen:

1. In einer ersten Einzelstunde sollte das Auflösungsvermögen optischer Instrumente auf traditionellem Wege erarbeitet werden, d.h. über das Interferenzbild bzw. den Intensitätsverlauf zweier Beugungsscheibchen, die entweder noch zu unterscheiden, oder aber eben nicht mehr zu unterscheiden sind. Ergebnis ist die Abhängigkeit des Auflösungsvermögens von der Wellenlänge der benutzten elektromagnetischen Strahlung sowie der Öffnung des verwendeten Instruments. Das Auflösungsvermögen wird mit größer werdender Wellenlänge sowie kleiner werdender Instrumentenöffnung immer schlechter. Von daher leuchtet ein, dass gerade radioastronomische Beobachtungsgeräte wegen der beachtlichen Wellenlängen eine große Öffnung haben müssen! Für den Grundgedanken dieses Unterrichtsvorschlags spielt es keine Rolle, ob das Thema in dieser Einstiegsstunde als Lehrervortrag dargestellt oder im Rahmen eines fragend-entwickelnden Gesprächs erarbeitet wird. Von selbst versteht sich aber wohl, dass ein veranschaulichendes Experiment (vielleicht sogar im Schülerversuch) nicht fehlen sollte.
2. In der nächsten Einzelstunde erhält jede(r) Schüler(in) entweder den Text von Feynman oder den von Martienssen. Bei der Frage, wer welchen Text bearbeitet, sollte die Lehrkraft bedenken, dass der Martienssen-Text im Abstraktionsgrad anspruchsvoller ist als der von Feynman. Um Verständnisfragen während der nächsten 45 Minuten möglichst ohne Hilfe der Lehrerin bzw. des Lehrers klären zu können, sollten nebeneinander sitzende Schülerinnen und Schüler immer den gleichen Text bearbeiten.
Insgesamt ist es pädagogisch von Bedeutung, dass den SuS in dieser Stunde bewusst ist, dass die Selbstbearbeitung eines Textes ebenso eine Unterrichtsmethode zur Stoffverarbeitung darstellt wie z. B. der Lehrervortrag auch (vgl. *Didaktisch-methodischer Kommentar* in Kapitel IVa). Das zu erwartende Schülerargument „Das mache ich lieber zu Hause!“ darf in dieser Stunde nicht zählen. Hier sind also ein paar methodische Bemerkungen der Lehrkraft auf der unterrichtlichen Metaebene nötig.
3. Im Rahmen der Hausaufgabe wird das intensive Textstudium fortgesetzt. Der Text sollte zu Ende gelesen, Unverstandenes und Fragen dabei notiert werden.
4. Zu Beginn dieser Doppelstunde treffen sich immer drei SuS, die den gleichen Text bearbeitet haben, in kleinen Expertengruppen. Dort werden für etwa eine halbe Stunde aufgetretene Probleme und Fragen zum studierten Text diskutiert und möglichst geklärt. Unter Umständen können sich die einzelnen Expertengruppen auch gegenseitig helfen. Darüber hinaus soll sich jede Experten- gruppe Gedanken dazu machen, wie man im Rahmen eines etwa 10-minütigen Vortrages die we-

sentlichen Argumentationsstränge des studierten Textes jemandem anschaulich vortragen bzw. erklären kann, der diesen Text nicht gelesen hat. Hier sind also ganz ausdrücklich didaktische und methodische Fragen zu diskutieren.

In der nachfolgenden halben Stunde stellen sich nun zwei Schüler(innen) (die natürlich nicht den gleichen Text studiert haben) gegenseitig die Kerngedanken ihres Textes vor. Jede(r) hat dabei etwa 10 Minuten Zeit für den Vortrag und noch einmal 5 Minuten zur Beantwortung von Fragen. SuS betätigen sich hierbei also als Lehrer(innen).

Der Rest der Doppelstunde steht im Klassenunterricht für Fragen zur Verfügung, die in den Expertengruppen nicht geklärt werden konnten bzw. erst beim Erklären des eigenen Textes aufgekommen sind. Hier ist das Knowhow der Lehrkraft gefragt.

Ob man nun jede(n) Schüler(in) eine Zusammenfassung / Bündelung zu dem studierten Text verfassen lässt oder aber Einzelnen die Chance für Sonderleistungen (z.B. in Form eines Handouts) eröffnet, liegt in der pädagogischen Hand der Lehrkraft.

IV. Ausführlicher didaktisch-methodischer Kommentar

a) Selbstgesteuertes Lernen

Jetzt ist es keine ganz neue Erkenntnis, dass sich SuS, wenn man sie denn lässt, sehr wohl selbstständig Sachverhalte erarbeiten können. Stillarbeitsphasen, in denen mitunter auch komplexe Sachverhalte eigenständig erarbeitet werden, gehören durchaus zum Unterrichtsalltag. Trotzdem äußerte sich der FOCUS in seiner Ausgabe vom 10. 08. 2011 recht reißerisch zum Thema, indem Autorin Elena Pelzer ihren Artikel mit „Werden Lehrer überflüssig?“ überschreibt. Es wird von einer Studie berichtet, die belegt, dass im untersuchten Mathematikunterricht selbstverantwortetes Lernen tatsächlich zu messbaren Erfolgen führt.

FOCUS schreibt:

Was selbst die Bildungsforscher überrascht: Ein signifikanter Unterschied zwischen den in Mathematik schwächeren und den stärkeren Schülern konnte nicht festgestellt werden. „Wir wissen nun, dass sich Schüler auch sehr komplexe Themen mit ihrem individuellen Tempo eigenständig aneignen können – das trifft auch auf schwächere Schüler zu“, erläutert Studienleiterin Kristina Reiss das Ergebnis der Studie. Sie bestätigt, was Pädagogen schon lange wissen: längere Phasen des selbstregulierten Lernens halten den Unterricht lebendig.

Offenkundig ist reformpädagogisches Gedankengut (einschließlich seiner damals erfolgreichen Erprobung) inzwischen sogar bis in die Studierzimmer der Bildungsforscher(innen) vorgedrungen. „Öffnung von Unterricht“ ist in Mode gekommen. Und das ist auch gut so, zeigen doch reformpädagogisch orientierte Schulen schon lange, dass selbstständiges und selbstverantwortetes Lernen von besonderer Qualität ist.

So ist der vorliegende Ansatz, SuS alternative Herleitungen des begrenzten Auflösungsvermögens astronomischer Instrumente selbstständig erarbeiten zu lassen, als ein Appell zu mehr offenen Unterrichtsformen zu verstehen. Lässt man die SuS darüber hinaus nicht ausschließlich alleine arbeiten, sondern bringt sie – wie vorgeschlagen – in Expertengruppen miteinander ins Gespräch und lässt sie am Ende dann als Vortragende die Lehrer(innen)rolle übernehmen, ist die Aussicht auf nachhaltigen Lernerfolg jedenfalls ganz sicher nicht kleiner als wenn die Thematik von der Lehrkraft vorgetragen wird.

b) Wissenschaftspropädeutik

Gute Unterrichtswerke zeichnen sich u.a. dadurch aus, dass sie komplexe Sachverhalte didaktisch reduzieren und schüler(innen)gerecht präsentieren. Das macht natürlich häufig ganz viel Sinn, unterstützt es uns Lehrer(innen) doch bei unseren Versuchen, jungen Menschen etwas beizubringen. Möchte man allerdings die Selbstlernkompetenzen von SuS stärken, erweisen sich Schulbücher immer wie-

der auch als kontraproduktiv, verhindern sie doch, dass SuS selbstständig z.B. nach Veranschaulichungen, Begründungszusammenhängen, Voraussetzungen recherchieren müssen. Lehrbücher bieten häufig perfekt abgestimmte Kost, erschweren damit aber, dass SuS selbstständig das Kochen lernen. Für so manchen hat der Uni-Schock auch damit zu tun, dass Texte, Herleitungen u.ä. plötzlich nicht mehr speziell aufbereitet sind, dass sie nicht auf die Frage „Was wurde bereits behandelt?“ Rücksicht nehmen, also keine mundgerechte Kost liefern.

Der vorliegende Unterrichtsvorschlag versteht sich also auch als Einstieg in die Bearbeitung schulfremder Sachtexte. Zwar haben sowohl Feynman als auch Martienssen ausdrücklich für Studierende geschrieben, aber eben nicht für SuS. So wird hier also Univorbereitung und damit auch Wissenschaftspropädeutik betrieben.

c) Wissenschaftstheorie

Jetzt mag man denken, der Lernzuwachs der SuS liege beim vorgeschlagenen Unterricht ausschließlich im Bereich methodischer Kompetenzen. Das ist aber meines Erachtens keineswegs der Fall. Es besteht ganz ausdrücklich die Chance, nicht nur Physik, sondern ganz viel *über* Physik zu lernen.

Feynmans Weg zum begrenzten Auflösungsvermögen über das Fermatsche Prinzip zeigt, dass man die Optik auch von einer ganz anderen Seite angehen kann. Die gesamte geometrische Optik lässt sich auf dem Fermatschen Prinzip aufbauen.⁷ Wissenschaftlich ist diese Formulierung gleichwertig. „Es ist unmöglich, eine Wahl zu treffen, da es keinen experimentellen Weg gibt, zwischen Möglichkeiten zu unterscheiden, die alle dieselben Folgen haben.“⁸ Psychologisch unterscheiden sie sich allerdings deutlich, stellt sich beim Fermatschen Prinzip doch die berechtigte Frage, woher das Licht im Voraus weiß, welches eigentlich der schnellste Weg ist. Die Quantenmechanik (genauer: die QED) liefert die verblüffende Antwort: *Es probiert sie alle aus, und zwar gleichzeitig*. Nun könnte es das Licht bzw. die elektromagnetische Strahlung sein, die sich auf solch eigenartige Weise benimmt. Es wurden aber auch für die Mechanik Extremalprinzipien formuliert (am bekanntesten ist sicherlich das Hamiltonsche Prinzip). So lässt sich z.B. die Bewegung der Erde um die Sonne mit Hilfe der Newtonschen Gesetze beschreiben und vorhersagen, ebenso genau aber mit dem Hamiltonschen Prinzip der kleinsten Wirkung. Für die Mechanik gibt es sogar eine dritte Alternative: die lokale Feldtheorie Einsteins.

Auch Martienssens Ansatz, optische Abbildungen als eine Form der Nachrichtenübertragung aufzufassen, bei der die räumliche Information gequantelt ist, beschreibt Altbekanntes verblüffend anders und kommt doch zum selben Ergebnis. „Die Vielfalt der Interpretationsmöglichkeiten gehört zu den erstaunlichsten Eigenschaften der Natur.“⁹ Das wird SuS im hier vorgeschlagenen Unterricht mehr als deutlich.

Angestoßen durch die alternativen Formulierungen zum Auflösungsvermögen drängen sich also wissenschaftstheoretische Fragen nach dem Wesen physikalischer Gesetze bzw. nach dem Zusammenhang zwischen Mathematik und Naturgesetzen geradezu auf. Auch an den Grundfesten unseres gesunden Menschenverstandes wird gerüttelt, bleibt beim Fermatschen bzw. Hamiltonschen Prinzip doch irgendwie die Kausalität der Welt auf der Strecke. Schließlich wittert das Licht bzw. das Teilchen „auf irgendeine großartige Weise sämtliche Kurven und Möglichkeiten und entscheidet sich für die ihm genehmste (d.h. die mit der kleinsten Größe).“¹⁰

Fragen über Fragen, die keineswegs alle beantwortet werden müssen (im Übrigen in der Kürze der Zeit natürlich auch gar nicht erschöpfend beantwortet werden *können*), die aber (hoffentlich) viele Fragezeichen und damit Spuren in Schüler(innen)köpfen hinterlassen. Der vorgeschlagene Unterricht bedient also u.a. eine der Forderungen des Physikdidaktikers Martin Wagenschein, Physik nie ohne Metaphysik zu unterrichten. Möge es gelingen!

Zusatzmaterial zum WIS-Beitrag:

Feynman.pdf, Focus-Artikel 'Werden Lehrer überflüssig'.pdf, Martienssen.pdf

⁷ Didaktische Überlegungen dazu: <http://didaktik.physik.hu-berlin.de/forschung/optik/download/veroeffentlichungen/fermat.pdf>

⁸ Feynman, R.P. (1990): Vom Wesen physikalischer Gesetze. München: Piper, S. 69.

⁹ Feynman, R.P. (1990): Vom Wesen physikalischer Gesetze. München: Piper, S. 71.

¹⁰ Feynman, R.P. (1990): Vom Wesen physikalischer Gesetze. München: Piper, S. 69.