

Ein bildbasierter Zugang zu spektroskopischen Versuchen

Sascha Grusche*

*Pädagogische Hochschule Weingarten, Kirchplatz 2, 88250 Weingarten
saschagrusche@gmail.com

Kurzfassung

Ein einfaches Spalt-Spektroskop erzeugt holografisch wirkende Bilder eines Stilllebens. Bunt beleuchtete Spaghetti verwandeln sich beim Blick durch ein Prisma in Videos, die mitten im Raum schweben. Diese beiden Versuche lassen sich durchaus im Strahlenmodell nachvollziehen. Andererseits bietet sich ein bildbasierter Verständniszugang an: Schließlich beruhen alle spektroskopischen Aufbauten darauf, dass sie eine Reihe von versetzten Bildern erzeugen. Schon Isaac Newton nutzte solch einen bildbasierten Zugang: Er begründete damit seine Theorie der unterschiedlich brechbaren Strahlen. Auch aus didaktischer Sicht erscheint es sinnvoll, sich zuerst die konkreten Bilder vor Augen zu führen, bevor abstrakte Strahlen eingeführt werden.

1. Einleitung

Versuchsaufbauten, bei denen ein Prisma oder Beugungsgitter ein ursprüngliches Abbild in eine Reihe verschiedenfarbiger Einzelbilder verwandelt, werden heute vorrangig in der Chemie, Biologie, Astronomie und Physik eingesetzt, um die chemische Zusammensetzung von Stoffgemischen [1], Gewebeproben [2], Sternen [3], Gewässern und Böden [4] optisch zu erschließen. Solche spektroskopischen Versuchsaufbauten sind auch für die entsprechenden Schulfächer relevant, vgl. [5,6].

Bei Lehrbuchdarstellungen von spektroskopischen Versuchen bildet der Strahlenbegriff üblicherweise den Ausgangspunkt, z.B. in [7]-[10]. Für erscheinungsorientierten Unterricht [11] ist es jedoch wünschenswert, sich zuerst konkrete Abbilder vor Augen zu führen, bevor abstrakte Strahlen eingeführt werden. Wie können wir spektroskopische Versuche im Sinne einer *Optik der Bilder* [12]-[19] verstehen?

Einen Ansatzpunkt finden wir in den Schriften von Isaac Newton [20,21]. Seine Prismenversuche erklärt er teils vom Strahlenmodell ausgehend, also strahlenbasiert; teils von konkreten Bildern ausgehend, also bildbasiert [19,22]. Wir werden seinen bildbasierten Zugang weiterführen, indem wir seinen strahlenbasierten Zugang umkehren, vgl. [19].

2. Newtons bildbasierter Zugang

Einen bildbasierten Zugang wählt Newton insbesondere für seine ersten Prismenversuche. Dort beobachtet er, dass das ursprüngliche Abbild je nach Farbe verschieden stark versetzt wird. Basierend auf den unterschiedlich versetzten Einzelbildern führt er sein Konzept von unterschiedlich brechbaren Strahlen ein.

2.1. Newtons bildbasierter Zugang zur Inspektion von roten und blauen Flächen durch ein Prisma



Abb. 1: Inspektion von roten und blauen Rechtecken durch ein Prisma.

Wenn wir auf schwarzem Grund ein rotes und ein blaues Rechteck nebeneinander platzieren und diese durch ein Prisma inspizieren, wirken sie voneinander getrennt, siehe Abb. 1.

Newton erkennt, dass das blaue Bild stärker versetzt ist als das rote. Basierend auf diesem Bildversatz kommt Newton zu dem Schluss, dass das Prisma blaue Strahlen stärker als rote brechen muss, siehe Experiment 1 in Book One, Part I von *Opticks* [21].

2.2 Newtons bildbasierter Zugang zur Projektion eines Sonnenbildes durch ein Prisma

Wenn wir ein Lochkamerabild der Sonne durch ein Prisma projizieren, verwandelt es sich bei ausreichendem Abstand vom Prisma in ein regenbogenfarbiges, längliches Bild. Newton erkennt in diesem Spektrum eine Reihe von unterschiedlich versetzten, verschiedenfarbigen Sonnenbildern, siehe Abb. 2.

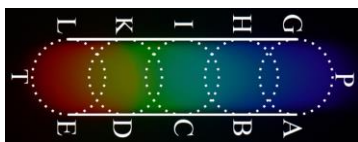


Abb. 2: Newtons bildbasierte Erklärung des Sonnenspektrums PT als Reihe von verschiedenfarbigen Sonnenbildern GA, HB, IC, KD und LE (in Anlehnung an Fig. 15 in Book One, Part I von *Opticks*).

Basierend auf den unterschiedlich versetzten, verschiedenfarbigen Einzelbildern der Sonne kommt Newton zu dem Schluss, dass weißes Sonnenlicht aus unterschiedlich brechbaren, verschiedenfarbigen Strahlen bestehen muss, siehe Experiment 5 in Book One, Part I von *Opticks* [21].

3. Newtons strahlenbasierter Zugang

Einen strahlenbasierten Zugang nutzt Newton insbesondere für erweiterte Prismenversuche. Basierend auf unterschiedlich brechbaren Strahlen kann er nun die versetzten Einzelbilder konstruieren, um spektrale Phänomene zu erklären und vorherzusagen.

3.1 Newtons strahlenbasierter Zugang zur Projektion eines Spaltes durch ein Prisma

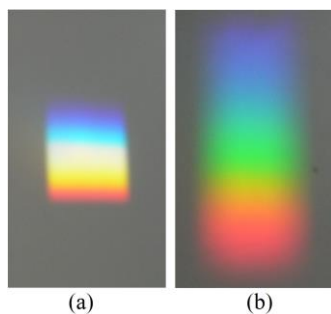


Abb. 3: Projektion eines Spaltes durch ein Prisma (mit Sonnenlicht) (a) auf einen nahen beziehungsweise (b) auf einen fernen Projektionsschirm.

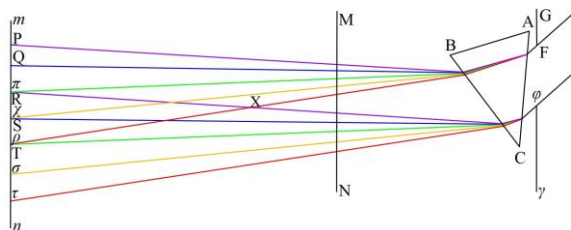


Abb. 4: Newtons strahlenbasierte Bildkonstruktion für die Projektion eines Spaltes $F\phi$ mittels Sonnenlicht durch ein Prisma ABC auf einen Projektionsschirm bei MN beziehungsweise mn (in Anlehnung an Figure 12 in Book I, Part II von Newtons *Opticks*). Die am wenigsten brechbaren Strahlen erzeugen ein rotes Einzelbild zwischen T und τ , die am stärksten brechbaren Strahlen erzeugen ein violettes Einzelbild zwischen P und π , mittelmäßig brechbare Strahlen erzeugen andersfarbige Einzelbilder dazwischen. Bei X küssen sich das rote und violette Bild. (Newton unterschlägt, dass die Einzelbilder bei mn vielmehr die Sonne als den Spalt darstellen, vgl. Abb. 3(b) und 2.)

Wenn Sonnenlicht durch einen breiten Spalt und ein Prisma fällt, ergibt sich nah hinter dem Prisma ein weißes Bild mit rot-gelbem und blau-violettem Saum, jedoch ein regenbogenfarbiges Bild weiter hinten im Raum, s. Abb. 3.

Basierend auf unterschiedlich brechbaren Sonnenstrahlen konstruiert Newton vom Spalt verschiedenfarbige Einzelbilder, s. Abb. 4. Anhand deren Überlagerung erklärt er die bunten Gesamtbilder, siehe Proposition VIII, Problem III in Book One, Part II von *Opticks* [21].

3.2 Newtons strahlenbasierter Zugang zur Inspektion eines Gegenstandes durch ein Prisma

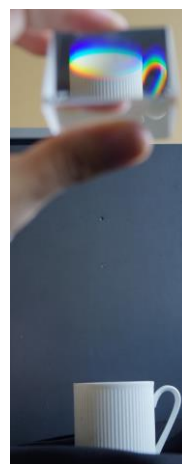


Abb. 5: Inspektion einer weißen Tasse durch ein Prisma.

Wird ein Gegenstand durch ein Prisma in den Blick genommen, wirkt er farblich gesäumt und dadurch verschwommen, s. Abb. 5. Newton erklärt dieses Gesamtbild anhand der Überlagerung verschiedenfarbiger, unterschiedlich versetzter Einzelbilder, siehe Paragraph 104 in *Optica*, Part II, Lecture 12 in [20]. Diese Einzelbilder konstruiert er basierend auf unterschiedlich brechbaren Strahlen, s. Abb. 6.

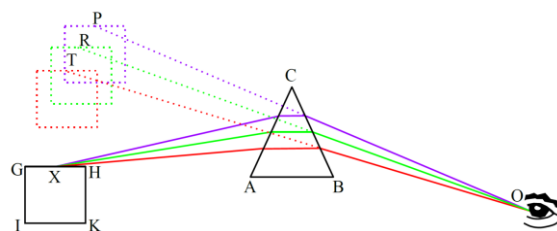


Abb. 6: Newtons strahlenbasierte Bildkonstruktion für die Inspektion eines Gegenstandes GXHKI durch ein Prisma ABC (in Anlehnung an Figure II, 41 von Newtons *Optica* in [20]). Die am wenigsten brechbaren Strahlen treten derart in das Betrachterauge O ein, dass ein rotes Einzelbild des Gegenstandes bei T erscheint; die am stärksten brechbaren Strahlen lassen ein violettes Einzelbild bei P erscheinen, die mittelmäßig brechbaren Strahlen ein grünes Einzelbild bei R. (Newton versäumt es, die Einzelbilder so zu drehen, dass sie den Gegenstand nach vorn geneigt darstellen, vgl. Abb. 5.)

Zuerst zeichnet Newton vom Gegenstand ausgehend verschiedenfarbige Strahlen in verschiedene Richtungen. Dann lässt er sie am Prisma unterschiedlich stark abknicken, um sie alle in das Betrachterauge zu schicken. Abschließend setzt Newton die ins Auge gehenden Strahlen rückwärts fort; so konstruiert er strahlenbasiert das jeweilige Einzelbild am scheinbaren Ort, s. Abb. 6.

4. Zwischenfazit

Newtons *strahlenbasierter Zugang* zu spektroskopischen Versuchen besteht aus folgenden Schritten:

1. Zeichne Strahlen vom Objekt zum Prisma und von dort zum Projektionsschirm (beziehungsweise zum Betrachterauge). Hierfür berechnest du deren unterschiedliche Ablenkung am Prisma.
2. Ermittle die Position des jeweiligen Einzelbildes. Hierfür verlängerst du die aus dem Prisma tretenden Strahlen vorwärts bis zum Projektionsschirm hin (beziehungsweise rückwärts vom Betrachterauge aus).

Durch Umkehrung der Schrittfolge erhalten wir einen *bildbasierten Zugang* zu spektroskopischen Versuchen:

1. Ermittle die Position des jeweiligen Einzelbildes. Hierfür beobachtest du das Gesamtbild mit schmalbandigen Farbfiltern beziehungsweise bei spektral diskreter Beleuchtung.
2. Zeichne Strahlen vom Projektionsschirm (beziehungsweise vom Betrachterauge) zum Prisma und von dort zum Objekt. Hierfür ziehst du Verbindungslinien zwischen gleichartigen Einzelbildern bei verschiedenen Schirmabständen (beziehungsweise Sichtverbindungen zwischen dem Betrachterauge und dem jeweiligen Einzelbild).

5. Ein bildbasierter Zugang zu modernen spektroskopischen Versuchen

Im Folgenden werden wir zwei moderne und unterhaltsame spektroskopische Versuche über einen bildbasierten Zugang erschließen. Zum einen betrachten wir spektral kodierte Videoprojektion [23]; zum anderen Pseudohologramme hinter einem einfachen Spektroskop [24].

5.1 Ein bildbasierter Zugang zur Projektion und Inspektion von Videos durch ein Prisma

Wenn wir ein Schwarzweißvideo durch ein Prisma quer über eine rohe Spaghetti-Nudel projizieren und diese durch ein zweites Prisma inspizieren, ist ein Video mitten im Raum zu sehen, s. Abb. 7. Wenn wir um die Spaghetti herumgehen, dreht sich das Video zu uns [23].

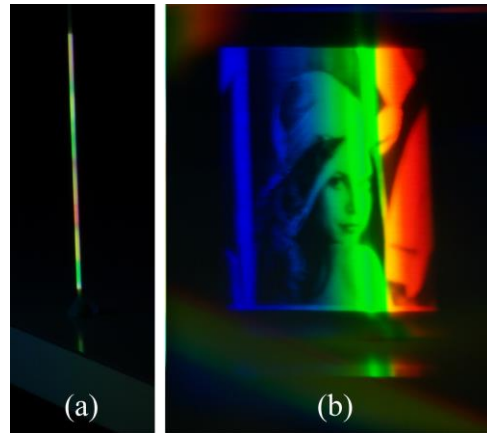


Abb. 7: Spektral kodierte Videoprojektion. (a) Auf der rohen Spaghetti bewegen sich bunte Lichtflecken auf und ab. (b) Beim Blick durch ein Prisma erscheint die Spaghetti verschwommen, stattdessen wird ein scharfes Video wahrgenommen.

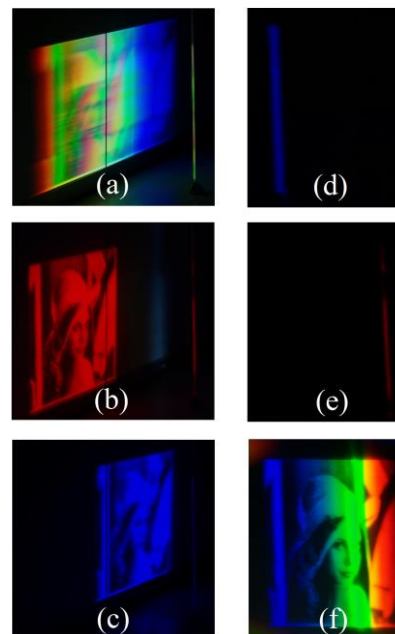


Abb. 8: Bildbasierte Erklärung spektral kodierter Videoprojektion. (a)-(c) Projektion eines Schwarzweißbildes durch ein Prisma auf eine Spaghetti vor einem zweidimensionalen Projektionsschirm; (d)-(f) Inspektion der Spaghetti durch ein zweites Geradsichtprisma; (a) und (f) ohne Farbfilter; (b)-(e) mit Farbfilter.

5.1.1 Systematische Beobachtung der Einzelbilder



Abb. 9: Lokalisierung der Einzelbilder bei verschiedenen Schirmabständen. Mit farbiger Knete werden die roten, grünen und blauen Einzelbilder hinter dem Prisma lokalisiert. Mit weißer Knete werden die Einzelbilder ohne Prisma lokalisiert. Linsenbedingt sind die Einzelbilder umso schärfer, je näher der Projektionsschirm am Ort X der Spaghetti ist.

Um den Abbildungsprozess basierend auf Einzelbildern zu verstehen, werden wir den Versuchsaufbau variieren.

Zwischenzeitlich stellen wir hinter die Spaghetti einen zweidimensionalen Projektionsschirm. *Ohne* Prisma vor dem Beamer erscheint ein schwarzweißes, scharfes Bild; *mit* Prisma vor dem Beamer wird das Schwarzweißbild bunt und verschwommen, s. Abb. 8(a). Werden schmalbandige Farbfilter vor das Auge genommen oder vor den Beamer gesetzt, wird deutlich: Das verschwommene Bild ist zusammengesetzt aus scharfen, gegeneinander versetzten Einzelbildern, s. Abb. 8(b)-(c). Somit wird von den verschiedenfarbigen Einzelbildern je ein anderer Streifen auf die Spaghetti projiziert.

Nun wird die Spaghetti durch das zweite Prisma inspiziert. Hierbei werden die Bildstreifen wieder farbspezifisch versetzt und zum scharfen, regenbogenfarbigen Bild zusammengesetzt, s. Abb. 8(d)-(f).

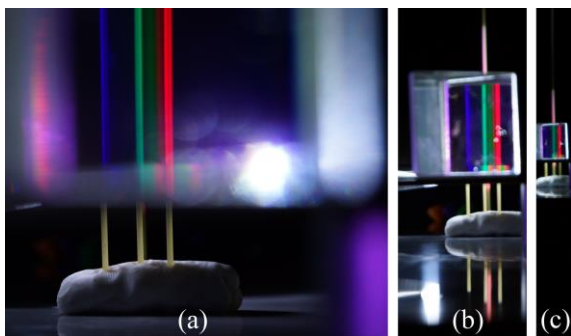


Abb. 10: Lokalisierung der Einzelbilder einer Spaghetti vor dem durchblickten Geradsichtprisma. Mit drei Spaghettibruchstücken werden die roten, grünen und violetten Einzelbilder der spektral diskret beleuchteten Spaghetti verortet. Sie erscheinen gegeneinander seitlich versetzt und zum Prisma hin verschoben. Der Versatz und die Bildverschiebung ändern sich scheinbar nicht, während das Betrachterauge sich in (a) bis (c) vom Prisma entfernt.

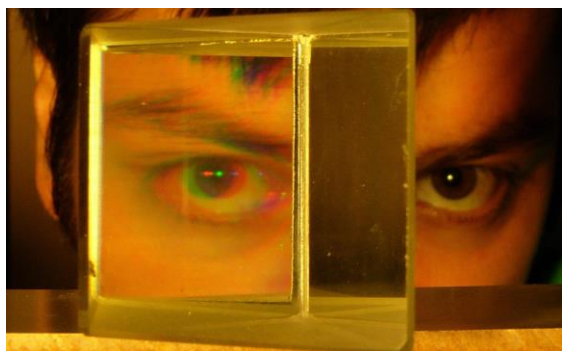


Abb. 11: Lokalisierung der Einzelbilder des Betrachterauges hinter dem durchblickten Geradsichtprisma. Die Einzelbilder des (mit einer Energiesparlampe beleuchteten) Auges erscheinen gegeneinander seitlich versetzt und näher am Prisma als das unbewaffnete Auge.

Nach diesen qualitativen Betrachtungen wollen wir den Abbildungsprozess quantitativ beschreiben.

Um die projizierten Einzelbilder bei verschiedenen Schirmabständen zu lokalisieren, markieren wir deren Ausdehnung auf dem Tisch, s. Abb. 9. Hierbei fällt auf, dass bei gegebenem Schirmabstand die projizierten Einzelbilder ohne Prisma etwas größer sind als mit Prisma; aus Sicht des Projektionschirms erscheint der Beamer *zum Prisma hin* verschoben; dadurch werden die projizierten Einzelbilder *vom Prisma weg* verschoben. Zudem nimmt der Versatz zwischen verschiedenfarbigen Einzelbildern mit zunehmendem Abstand zwischen Prisma und Projektionsschirm zu.

Um die Einzelbilder der prismatisch inspizierten Spaghetti zu lokalisieren, werden wir Spaghettibruchstücke an den scheinbaren Bildorten platzieren. Dies erreichen wir, indem wir:

1. das projizierte Schwarzweißbild auf drei weiße Streifen in schwarzer Umgebung beschränken,
2. durch leichte seitliche Kopfbewegungen die scheinbaren Bildorte parallaxtisch ermitteln [17],
3. wechselweise durch das Geradsichtprisma hindurch und an dessen Unterkante vorbei schauen, um die Spaghetti-Bruchstücke an den scheinbaren Bildorten aufzustellen, und
4. die ermittelten Bildorte mit dem manuellen Fokus einer Kamera überprüfen [17].

Hierbei stellen wir fest, dass die Einzelbilder der Spaghetti nicht nur gegeneinander versetzt sind, sondern sich auch näher am Prisma befinden als die Spaghetti. Entfernen wir uns vom Prisma, scheinen die Einzelbilder an ihrem Ort zu bleiben, s. Abb. 10.

Umgekehrt erscheint auch aus Richtung der Spaghetti das Betrachterauge zum Prisma hin verschoben und je nach Farbe seitlich versetzt, s. Abb. 11. (Dies bedeutet wiederum im Umkehrschluss, dass wir die Spaghetti nicht nur näher, sondern auch je nach Farbe aus unterschiedlicher Perspektive sehen!)

Abstandsmessungen bei der Projektion und bei der Inspektion durch unser Geradsichtprisma ergeben:

1. Die **Bildverschiebung** h entlang der Projektionsbeziehungsweise Inspektionsrichtung ist nahezu konstant, unabhängig vom Abstand zwischen Prisma und Projektor beziehungsweise Auge.
2. Der **Versatz** d zwischen verschiedenfarbigen Einzelbildern ist nahezu direkt proportional zum Abstand D zwischen einem Einzelbild und der Prismenmitte, unabhängig vom Betrachterabstand, also $d/D \approx \delta = \text{konst.}$, wobei δ den Dispersionswinkel bezeichnet, vgl. [23].

5.1.2 Bildbasierte Einführung des Strahlenkonzepts

Für eine bildbasierte Einführung von Strahlen wenden wir Newtons strahlenbasierte Bildkonstruktion rückwärts an.

Für die Beamerprojektion durch das Prisma orientieren wir uns an Newtons Strahlenzeichnung in Abb. 4: Newtons Spalt $F\phi$ entspricht der Beamerprojektion zwischen Beamer und Prisma, Newtons Sonne bildet das Projektionszentrum und entspricht somit der Beamerlinse, s. Ab. 12. Am Ort X küssen sich die roten und violetten Einzelbilder, hier steht die Spaghetti [23], vgl. Abb. 9 und 12.

Für die prismatische Inspektion der Spaghetti orientieren wir uns an Newtons Strahlenzeichnung in Abb. 6: Die Strahlen zwischen Betrachterauge und Prisma konstruieren wir anhand der Einzelbilder der bei X befindlichen Spaghetti, s. Abb. 13(a). Nicht dargestellt hat Newton die Einzelbilder des Auges; diese brauchen wir jedoch, um die Strahlen zwischen Spaghetti und Prisma zu konstruieren, s. Abb. 13(b), vgl. [18].

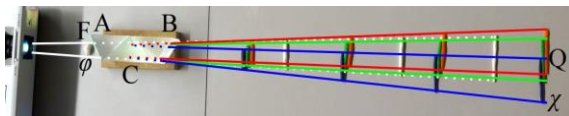


Abb. 12: Bildbasierte Strahlenkonstruktion für die Projektion eines (zwischen F und ϕ unscharf erkennbaren) Schwarzweißbildes durch ein Geradsichtprisma ABC; analog zu Abb. 4. Basierend auf den verschiedenfarbigen Einzelbildern, beispielsweise dem blauen zwischen Q und χ , werden die Strahlen hinter dem Prisma ABC konstruiert. Basierend auf den Positionen des Schwarzweißbildes ohne Prisma werden die Strahlen vor dem Prisma konstruiert.

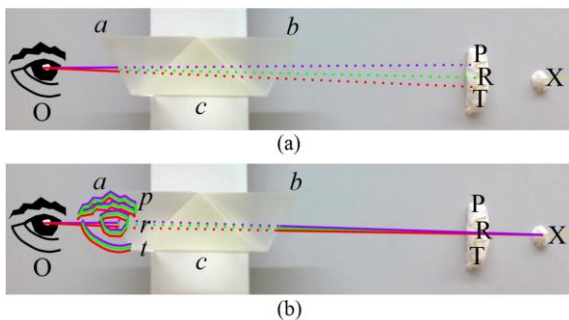
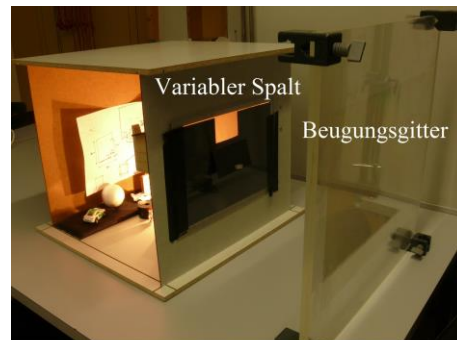
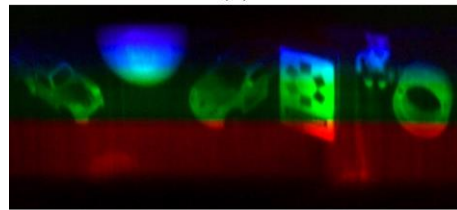


Abb. 13: Bildbasierte Strahlenkonstruktion für ein Betrachterauge O, das durch das Prisma abc eine Spaghetti am Ort X inspiziert; analog zu Abb. 6. (a) Basierend auf den roten, grünen und violetten Einzelbildern der Spaghetti bei T, R, und P werden die Strahlen zwischen Prisma und Betrachterauge konstruiert. (b) Basierend auf den roten, grünen und violetten Einzelbildern des Betrachterauges bei t , r und p werden die Strahlen zwischen Spaghetti und Prisma konstruiert.

5.2 Ein bildbasierter Zugang zur Inspektion von Gegenständen durch ein einfaches Spektroskop



(a)



(b)

Abb. 14: Inspektion eines Stilllebens durch ein einfaches Durchsicht-Spektroskop. (a) Das Spektroskop besteht aus einem variablen Spalt vor einem Beugungsgitter. Das Stillleben vor dem Spektroskop wird je nach didaktischer Absicht mit einer Halogenlampe beziehungsweise einer Energiesparlampe beleuchtet und ist mit Platten zu umkleiden, um Streulicht in den abzuklingenden Raum zu vermeiden. Ein Spiegel direkt vor dem Spektroskop stellt das Stillleben scheinbar auf den Kopf, damit dessen Pseudohologramm in (b) aufrecht steht.

Schauen wir durch ein einfaches Spektroskop aus genügend großem Abstand, sehen wir ein Pseudohologramm vom davor befindlichen Gegenstand, s. Abb. 14. Wenn wir an das Spektroskop heranschreiten, beginnt das konkrete Bild sich zum abstrakten Spektrum aufzuweiten [24].

5.2.1 Systematische Beobachtung der Einzelbilder

Um das Gesamtbild basierend auf Einzelbildern systematisch zu verstehen, werden wir den Versuchsaufbau variieren. Wenn wir den Spalt des Spektroskops verbreitern, wird das Gesamtbild unscharf, s. Abb. 15(a). Bei Beleuchtung mit einer Energiesparlampe sehen wir, dass dieses Gesamtbild zusammengesetzt ist aus scharfen, gegeneinander versetzten Einzelbildern des Stilllebens, s. Abb. 15(b). Sie stehen Kopf, da sich vor dem Spalt ein Spiegel befindet; somit sehen wir nicht Einzelbilder des Stilllebens, sondern seines Spiegelbildes. Wenn wir den Spalt schmal machen, erhalten wir von den verschiedenfarbigen Einzelbildern jeweils einen anderen schmalen Streifen, s. Abb. 15(c). Bei Beleuchtung mit einer Halogenlampe setzen sich die verschiedenen Bildstreifen zu einem scharfen, regenbogenfarbigen, umgekehrten Gesamtbild zusammen, s. Abb. 15(d).

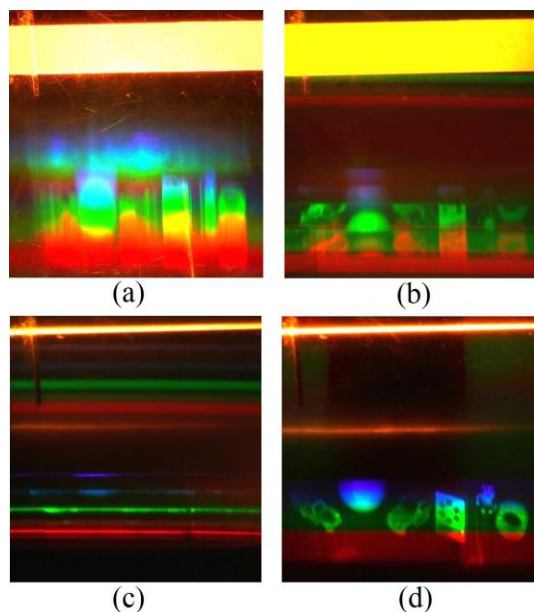


Abb. 15: Bildbasierte Erklärung des Pseudohogramms; analog zu Abb. 8. Der Spalt ist breit bei (a) und (b), aber schmal bei (c) und (d); die Beleuchtung ist spektral kontinuierlich in (a) und (d), aber spektral diskret in (b) und (c).

Um die Einzelbilder des Spaltes und des Stillebens zu lokalisieren, werden wir gleichartige Gegenstände an den scheinbaren Bildorten platzieren, vgl. [17]. Um dies zu erleichtern, vereinfachen wir zunächst den Versuchsaufbau, indem wir:

1. die spektral kontinuierliche Halogenlampe durch eine spektral diskrete Energiesparlampe ersetzen,
2. das Stilleben auf eine einzige Streichholzschachtel beschränken,
3. das Spektroskop und den Spiegel um 90° drehen, so dass Spalt, Gitterlinien und der Spiegel senkrecht stehen (um alle Gegenstände bequem auf der Tischfläche aufstellen zu können),
4. den Spiegel vom Spalt wegnehmen und stattdessen die Streichholzschachtel am Ort ihres ehemaligen Spiegelbildes aufstellen, und
5. den Spalt durch einen Steg ersetzen, beispielsweise eine Spaghetti (um zu vermeiden, dass die Schachtelbilder größtenteils verdeckt werden).

Der Ort und die Proportionen eines gegebenen Einzelbildes hängen vom Ort des Betrachters ab. Zur Vereinfachung beschränken wir unsere Betrachtung auf die Tischebene, vgl. [17]. Je nach Blickrichtung erscheint ein Einzelbild nur bei einem bestimmten Betrachterabstand unverzerrt, bei anderen Betrachterabständen wirkt es entweder gestaucht oder gedehnt; dies wird besonders deutlich, wenn wir zwischenzeitlich die Streichholzschachtel durch einen Tischtennisball ersetzen und vor die Energiesparlampe einen Farbfilter setzen, s. Abb. 16.

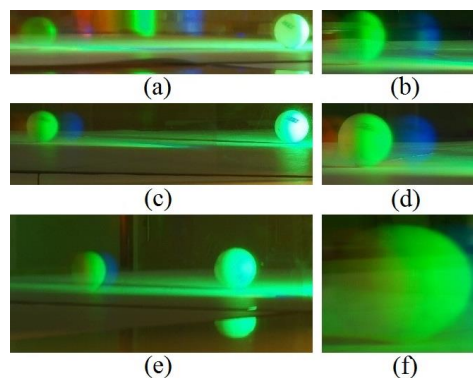


Abb. 16: Verzerrung des grünen, nach links versetzten Einzelbildes eines Tischtennisballs jenseits eines Gitters mit 1000 Linien/mm. (a)-(b) Flacher Blick von links; mit abnehmendem Betrachterabstand geht das Bild von *horizontaler Dehnung* zu *horizontaler Stauchung* über. (c)-(d) Blick unter einem Winkel von 18° zum Lot am Gitter; mit abnehmendem Betrachterabstand bleibt das Bild unverzerrt. (e)-(f) Flacher Blick von rechts; mit abnehmendem Betrachterabstand geht das Bild von *horizontaler Stauchung* zu *horizontaler Dehnung* über.

Durch Hin- und Hergehen finden wir eine einzige Blickrichtung, unter der das Einzelbild unverzerrt und ortsfest wirkt, und zwar für beliebige Betrachterabstände, s. Abb. 16(c)-(d). Im Folgenden beschränken wir uns auf diese Blickrichtung.

Die Schachtel und Spaghetti stellen wir so auf, dass ihr grünes Einzelbild jeweils entlang der verzerrungsfreien Richtung erscheint. Um deren Einzelbilder zu lokalisieren, bringen wir gleichartige Schachtel- und Spaghetti-Segmente mit den Einzelbildern in Deckung, s. Abb. 17, vgl. [17].

Perspektivisch bedingt ändern sich die Verdeckungsverhältnisse mit dem Betrachterabstand: In gewissem Abstand vom Gitter verbergen die Spaghettibilder jeweils einen anderen Teil der Schachtelbilder, s. Abb. 17(a)-(b); direkt am Gitter verbergen alle Spaghettibilder jeweils denselben Teil der Schachtelbilder, s. Abb. 17(c).

Basierend auf der räumlichen Anordnung der Einzelbilder können wir auch abhandeln, warum die Pseudohogramme sich in abstrakte Spektren verwandeln, wenn wir zum Spektroskop hin wandeln, s. Abb. 18: Bei ausreichendem Abstand vom Gitter sieht der Betrachter durch die Spaltbilder jeweils einen anderen Streifen des Gegenstands, s. Abb. 17(a)-(b). Aufgereiht ergeben diese verschiedenartigen Bildstreifen eine regenbogenfarbige Version des Gegenstands, also ein konkretes, aber seitenverkehrtes Bild, s. Abb. 18(a)-(b). Direkt am Gitter sieht der Betrachter durch jedes Spaltbild jeweils denselben Streifen des Gegenstands, s. Abb. 17(c). Aufgereiht ergeben diese gleichartigen Bildstreifen ein langgezogenes Bild von einem streifenförmigen Bereich des Gegenstands, also ein abstraktes Spektrum, s. Abb. 18(c).

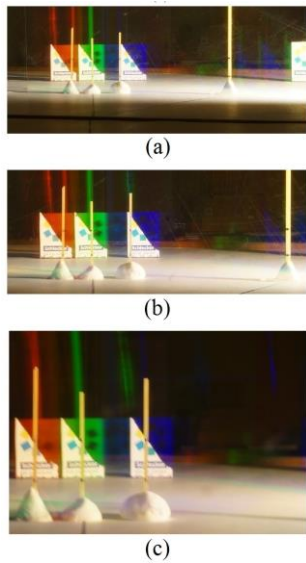


Abb. 17: Lokalisierung verschiedenfarbiger Einzelbilder einer Streichholzschachtel und eines Stegs jenseits des Gitters. Gleichartige Schachtel- und Steg-Segmente werden mit ausgewählten Einzelbildern in Deckung gebracht. Der Betrachter nähert sich von (a) nach (c) entlang der mittleren Sichtverbindung (zwischen den grünen Einzelbildern des Stegs und der Schachtel) dem Gitter.

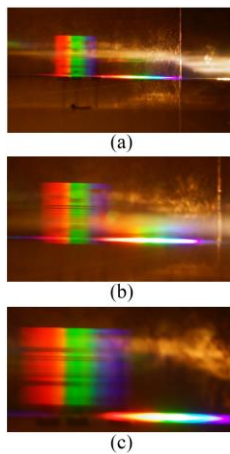


Abb. 18: Vergrößerung des Pseudohologramms (einer Streichholzschachtel) in Dispersionsrichtung bei Verringerung des Betrachterabstandes von (a) nach (c).

Messungen auf dem Tisch ergeben (für die verzerrungsfreie Blickrichtung):

1. Der Gegenstand, sein unverzerrtes Einzelbild und der Durchblickpunkt am Gitter bilden ein gleichschenkliges Dreieck, dessen Basis parallel zum Gitter liegt.
2. Die verschiedenfarbigen Einzelbilder liegen ungefähr auf einem Kreisbogen; ihr gegenseitiger **Versatz** d (im Sinne der Bogenlänge) ist nahezu direkt proportional zum Abstand D zwischen einem Einzelbild und dem Durchblickpunkt am Gitter, unabhängig vom Betrachterabstand, also $d/D \approx \delta = \text{konst.}$, wobei δ den Dispersionswinkel bezeichnet.

Für einen entsprechenden Modellversuch ersetzen wir das Gitter durch eine Glasplatte, die Einzelbilder des Spaltes durch ein Regenbogenfenster in Form spaltförmiger Farbfilter, und die Einzelbilder des Gegenstandes vor dem Spalt durch verschiedenfarbige Versionen des Gegenstandes, s. Abb. 19. Um den gegenseitigen Versatz der Einzelbilder quantitativ korrekt zu modellieren, durchleuchten wir das Regenbogenfenster mit einer weißen LED-Lampe am Durchblickpunkt an der Glasplatte und stellen die verschiedenfarbigen Gegenstände an den jeweils gleichfarbig beleuchteten Orten auf. Während der Versuchsdurchführung ist diese Lampe auszuschalten und eine zweite weiße Lampe anzuschalten, um die Gegenstände zu beleuchten. Das Regenbogenfenster und die aufgereihten Gegenstände verhalten sich in diesem Modellversuch (bei unverzerrter Blickrichtung) akkomodativ, parallaktisch und größenmäßig genauso wie die Einzelbilder des Spaltes und der Gegenstände im spektroskopischen Versuch, vgl. Abb. 20(a)-(c) mit Abb. 17(a)-(c).

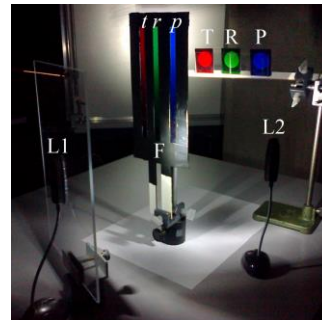


Abb. 19: Versuchsaufbau zur Simulation eines einfachen Durchsicht-Spektroskops. Das Regenbogenfenster F repräsentiert die Einzelbilder des Spaltes bei p , r und t . Lampe L1 dient der Bestimmung der Orte P, R und T verschiedenfarbiger Versionen eines Gegenstandes; Lampe L2 dient deren Beleuchtung.

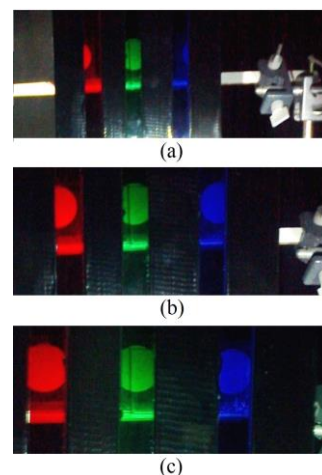


Abb. 20: Ergebnisse der Simulation eines Durchsichtspektroskops. Während sich das Beobachteraue dem Spektroskop von (a) nach (c) nähert, unterscheiden sich die einzelnen Spaltdurchsichten bezüglich der angeblickten Streifen des Gegenstands immer weniger.

5.2.2 Bildbasierte Einführung des Strahlenkonzepts

Für eine bildbasierte Einführung des Strahlenkonzepts orientieren wir uns an Newtons Strahlenzeichnung in Abb. 6: Zuerst ziehen wir die Verbindungslinien OP, OR, OT zwischen Auge und den beobachteten Einzelbildern. Danach verknüpfen wir diese Sichtverbindungen via Dispersionselement ABC mit dem Gegenstand bei X, s. Abb. 21(a). Analog behandeln wir den Spalt bei x und seine Bilder bei p , r , und t , s. Abb. 21(b).

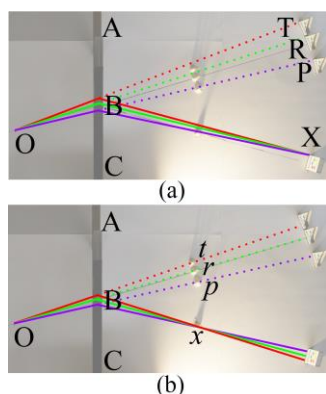


Abb. 21: Bildbasierte Strahlenkonstruktion am Gitter ABC (1000 Linien/mm), analog zu Abb. 6. Basierend auf den Einzelbildern einer Schachtel bei P, R, und T (bzw. eines Stegs bei p , r , und t) werden Strahlen als Sichtverbindungen zwischen Auge O und der Schachtel bei X (bzw. dem Steg bei x) eingeführt. (a) Strahlen zwischen linker Schachtelkante und Auge. (b) Strahlen zwischen verschiedenen Schachtelstreifen und Auge, via Steg.

6. Diskussion

Bei der Projektion und Inspektion durch ein Geradsichtprisma haben wir beobachtet, dass die virtuellen Einzelbilder eines Gegenstands (beispielsweise des Projektors, des Projektionsschirms, oder des inspezierenden Auges) jeweils zum Prisma hin verschoben und gegeneinander versetzt erscheinen. Der optische Gesamteffekt des Geradsichtprismas setzt sich also zusammen aus den Einzeleffekten der optischen Hebung und der optischen Dispersion. Nahezu konstant ist die hebungsbedingte Bildverschiebung h , ebenso wie der Quotient aus dispersionsbedingtem Versatz d und Gegenstandsweite D ; unabhängig vom Betrachterabstand. Mit bildbasierten Strahlenkonstruktionen ist Matthias Rang in anderem Kontext [18] zu denselben Ergebnissen gelangt.

Bei der Inspektion durch ein Gitter entfällt die optische Hebung wegen der Dünnhheit des Gitters. Müller und Schön [17] haben virtuelle Einzelbilder am Gitter für beliebige Blickrichtungen lokalisiert. Hinsichtlich der Akkommodation und Parallaxe liegt das jeweilige Einzelbild auf einer Kaustik; hinsichtlich der scheinbaren Größe jedoch auf einer Konchoide [17]. Die Kaustik und die Konchoide haben genau einen gemeinsamen Schnittpunkt.

Unseren Beobachtungen zufolge entspricht dieser Schnittpunkt dem scheinbaren Ort des Einzelbildes bei verzerrungsfreier Blickrichtung, denn der Schnittpunkt bildet mit dem Gegenstand und dem Durchblickpunkt am Gitter ein gleichschenkliges Dreieck, dessen Basis parallel zum Gitter verläuft. Nur unter dieser verzerrungsfreien Blickrichtung kann ein Bild an einem wohldefinierten und unveränderlichen Ort entstehen, denn bei anderen Blickrichtungen würde eine Diskrepanz zwischen parallaktischem Verhalten und Bildgröße entstehen (da dort die Kaustik und Konchoide auseinanderliegen).

Die verzerrungsfreie Richtung geht einher mit der so genannten *minimalen Ablenkung*. So werden sowohl Gitter [25] als auch Prismen [20],[21],[26] bevorzugt eingesetzt. Für ein *dreieckiges* Prisma hat Newton strahlenbasiert gezeigt, dass nur bei minimaler Ablenkung ein projiziertes Einzelbild der Sonne unverzerrt ist (s. *Optica*, Part I, Lecture I, Absätze 4-5 in [20], vgl. Experiment 3 in Book One, Part I von *Opticks* [21]) und das Bild eines inspezierten Gegenstands ungefähr im selben Abstand vom Prisma wie der Gegenstand erscheint (s. *Lectioes opticae*, Lecture 18, Absatz 180 in [20]). Für das Gitter haben wir bildbasiert dasselbe gezeigt. Hierbei bleibt die Frage offen, wie sich für *beliebige* Blickrichtungen durch das Gitter (beziehungsweise Prisma) derjenige Betrachterabstand vorhersagen lässt, bei dem das Einzelbild unverzerrt erscheint.

Den Blick durch ein einfaches Spektroskop haben wir modelliert als Blick durch ein Regenbogenfenster auf eine Reihe von verschiedenfarbigen Versionen des Gegenstandes vor dem Spektroskop. Matthias Rang kam unabhängig von mir (im Zusammenhang mit einem linsenbasierten Spektroskop) auf die Idee des Regenbogenfensters und erkannte, dass damit sogar die spektrale Auflösung des Gesamtbildes vorhersagbar sein müsste [27].

7. Fazit

Durch Beobachtung versetzter Einzelbilder sind wir zu einem qualitativen und quantitativen Verständnis von spektroskopischen Versuchen gekommen, noch ehe wir zum Strahlenbegriff übergegangen sind. Bei der bildbasierten Strahlenkonstruktion ergaben sich Einsichten und Fragen, die bei strahlenbasierter Bildkonstruktion leicht versäumt werden.

8. Danksagung

Ich danke Dr. Matthias Rang für die ergiebigen Gespräche, Prof. Dr. Johannes Grebe-Ellis für seinen Hinweis auf die Unmöglichkeit eines einzelnen Bündels paralleler Lichtstrahlen, Prof. Dr. Florian Theilmann für seine Besuche in meinem Optiklabor, Alfred Steidle für den Bau des Spektroskop-Kastens, und Tobias Münzing für das Zurechtsägen der spaltförmigen Farbfilter.

9. Literatur

- [1] Hesse, Manfred (2005): Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie. Stuttgart: Thieme
- [2] Galla, Hans-Joachim; Müller, Hans-Jürgen (1988): Spektroskopische Methoden in der Biochemie. Stuttgart: Thieme
- [3] Weigert, Alfred; Wendker, Heinrich J.; Wisotzki, Lutz (2012): Astronomie und Astrophysik: ein Grundkurs. Berlin: John Wiley & Sons
- [4] Del Bianco, Alessandro; Kurzmann, Andreas; Kessler, Rudolf W. (2006): Bildgebende optische und spektroskopische Verfahren. In: Prozessanalytik: Strategien und Fallbeispiele aus der industriellen Praxis, S. 313-339
- [5] Uhlmann, Stefan; Bisping, Vera; Priemer, Volker (2009): Spektroskopieversuche mit der Plasmakugel. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, S. 1-7, Url: <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/212/254>
- [6] Carmesin, Hans-Otto (2014): Schülerinnen und Schüler präsentieren ihr neuartiges spektrales Planetarium. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, S. 1-9, Url: <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/559/706>
- [7] Spitz, Christian (2010): Selbstverständlich Physik. Lehrbuch für die Gymnasiale Oberstufe Baden-Württemberg. Berlin, Mannheim: Duden Schulbuchverlag
- [8] Giancoli, Douglas (2011): Physik. Gymnasiale Oberstufe. München: Pearson Schule
- [9] Pitka, Rudolf (2009): Physik. Der Grundkurs. Frankfurt: Harri Deutsch Verlag
- [10] Gerthsen, Christian (2010): Gerthsen Physik. Berlin: Springer-Verlag
- [11] Theilmann, Florian (2011): Die Kunst der Untersuchung: Essays zu einem erscheinungsorientierten Physikunterricht. Habilitationsschrift, Url: <https://publishup.uni-potsdam.de/opus4-ubp/frontdoor/index/index/docId/5457>
- [12] Maier, Georg (1986): Optik der Bilder. Dürnau: Verlag der Kooperative Dürnau
- [13] Sommer, Wilfried; Grebe-Ellis, Johannes; Vogt, Jürgen (2004): Zur Beugung - Von einfachen Freihandversuchen über die Laue-Kegel zum reziproken Gitter und zur Ewald-Kugel. In: PhyDid A-Physik und Didaktik in Schule und Hochschule 2, 3, S. 67-86, Url: <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid/article/view/24/24>
- [14] Grebe-Ellis, Johannes (2006): Phänomenologische Optik: eine 'Optik der Bilder.' Teil 1: Erkenntnistheoretische, experimentiermethodische und didaktische Merkmale eines nichtreduktionistischen Zugangs zur Optik. In: chim. did. 32, S. 137-186
- [15] Sommer, Wilfried; Meinzer, Nicholas (2009): Vom Kranz zum Beugungsbild-Untersuchung von Unordnungs-Ordnungs-Übergängen. In: PhyDid A, Physik und Didaktik in Schule und Hochschule 4, 8, S. 104-111, Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/97/103>
- [16] Grebe-Ellis, Johannes; Theilmann, Florian; Rang, Matthias (2009): Lichtspuren im Wasser-Ein Experiment zum Verhältnis von Brechung und Hebung. In: PhyDid A, Physik und Didaktik in Schule und Hochschule 3, 8, S. 86-91, Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/90/96>
- [17] Müller, Marc; Schön, Lutz-Helmut (2011): Virtuelle Beugungsbilder am Gitter. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, S. 1-9, Url: <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/288/348>
- [18] Rang, Matthias (2014): Phänomenologie komplexer Spektren. Dissertation
- [19] Grusche, Sascha (2015): Revealing the nature of the final image in Newton's *experimentum crucis*. Am. J. Phys., im Druck
- [20] Newton, Isaac (2010): The Optical Papers of Isaac Newton, Volume I. The Optical Lectures 1670-1672, edited by Alan E. Shapiro. Cambridge: Cambridge University Press
- [21] Newton, Isaac (1979): Opticks: Or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light, 4th edition. Mineola: Dover Publications
- [22] Grebe-Ellis, Johannes (2011): Bild und Strahl in der Optik Newtons. In: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Band 20, S. XII-XVIII
- [23] Grusche, Sascha (2014): Spectral synthesis provides two-dimensional videos on a one-dimensional screen with 360°-visibility and mirror-immunity. In: Appl. Opt. 53, 4, S. 674-684
- [24] Grusche, Sascha (2014): Basic slit spectroscope reveals three-dimensional scenes through diagonal slices of hyperspectral cubes. In: Appl. Opt., 53, 20, S. 4594-4603
- [25] Jeppesen, Myron A. (1970): Diffraction gratings and minimum deviation. In: Am. J. Phys. 38, S. 382-383
- [26] Skinner, Charles H. (1919): Determination of the refracting angle of a prism, and the angle of minimum deviation. In: School Science and Mathematics, 19, 2, S. 119-122
- [27] Rang, Matthias. Gespräch mit Sascha Grusche am 17.11.2014 in Basel/Schweiz