

Präkonzepte zur Projektion und Inspektion durch ein Prisma

Sascha Grusche*

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

Kurzfassung

Das Thema Brechung und Dispersion am Prisma hat einen festen Platz im Kanon des Optikunterrichts. Für die Entwicklung von Unterrichtskonzepten ist es notwendig, die Präkonzepte der Lernenden zu erfassen. Bisher wurden Präkonzepte einerseits zur brechungsbedingten Bildverrückung, andererseits zur dispersionsbedingten Farbauffächerung erhoben. Damit wurden zwei Phänomene getrennt behandelt, obwohl sie stets zusammen auftreten, nämlich als farbabhängige Bildverrückung. Um Präkonzepte im Hinblick auf dieses Gesamtphänomen zu erfassen, wurden schriftliche und mündliche Befragungen zur Projektion und Inspektion durch ein Prisma durchgeführt. Die Ergebnisse können dazu dienen, das Thema Brechung und Dispersion am Prisma lernergerechter als bisher aufzubereiten.

1. Einleitung

Ein weißer Kreis wird durch ein Prisma projiziert: „*Es war zuerst eine angenehme Ablenkung, die lebhaften [...] Farben zu sehen [...] Aber [...] ich war überrascht, dass ich sie in einer länglichen Form sah, die meiner Erwartung nach [...] hätte rund sein sollen.*“ (Ins Deutsche übersetzt aus [1])

Eine weiße Wand wird durch ein Prisma inspiziert: „*Ich erwartete, [...] die ganze weiße Wand nach verschiedenen Stufen gefärbt [...] zu sehen. Aber wie verwundert war ich, als die durchs Prisma angeschaut weiße Wand nach wie vor weiß blieb.*“ [2]

Hier äußern Newton [1] und Goethe [2] ihre *vorwissenschaftlichen Vorstellungen* zur Projektion und Inspektion durch ein Prisma. In ähnlicher Weise verfügen Schülerinnen und Schüler über *vorunterrichtliche Vorstellungen* zu diesem klassischen Thema. Diese Präkonzepte sollen im Unterricht berücksichtigt werden. Bereits erhobene Präkonzepte fassen wir im Folgenden zusammen.

Bei der **Inspektion eines Gegenstands** durch ein Prisma wissen viele Lernende, dass das prismatische Bild mit Lichtbrechung zu tun hat, deuten aber die Erzeugung und Betrachtung des virtuellen Bildes als zwei getrennte Vorgänge [3]. Vor dem Optikunterricht nutzen die Lernenden typischerweise eine *holistische Denkfigur* („Image Holistic Scheme“), in der das Bild als Ganzes sich vom Gegenstand ablöst und durch das Prisma geht [3,4]. Im Unterricht lernen sie eine *Punkt-zu-Punkt-Denkfigur* („Point-to-Point Mapping“) kennen. Demzufolge gehen von jedem Objektpunkt mehrere Strahlen derart durch das Prisma zum Auge, dass sie von einem entsprechenden Bildpunkt zu kommen scheinen [3,4]. Nach

dem Optikunterricht nutzen die Lernenden typischerweise eine *hybride Denkfigur* („Image Projection Scheme“), in der jeder Bildpunkt entlang jeweils eines Strahls zum Betrachter transportiert wird [3,4,5]. Nur selten können sie den korrekten *Strahlenverlauf* angeben. Häufig nehmen sie an, dass ein Strahl vom Objekt zum Prisma auf direktem Wege geht, statt schräg [3,4,5]. Hierbei verwenden die meisten Lernenden einen Strahlbegriff, bei dem Strahlen keine geometrischen Linien, sondern körperhaft sind [4]. Einige Lernende nehmen an, dass Strahlen vom Auge den Gegenstand erfassen [6].

Bei der **Projektion eines Spaltbildes** durch ein Prisma gehen die meisten Lernenden von einem Färbeverhalten des Prismas aus [7]. Viele Lernende akzeptieren jedoch die Erklärung, dass ein Prisma sonnenartiges Licht in seine verschiedenfarbigen Bestandteile zerlegt [7]. Hierbei machen sie aber eher das Glas als die Form des Prismas verantwortlich [7]. Werden Farbfilter in das Spektrum gehalten, gehen einige Lernende von einem Farbmischverhalten oder von einem Färbeverhalten des Filters aus [7]. Selbst nach Unterricht über Spektroskopie verstehen nicht alle Lernenden die optische Wirkung eines Prismas. Nur wenige Lernende erwarten, dass sich ein Spaltspektrum in ein einziges Spaltbild verwandelt, wenn man das Prisma aus dem spektroskopischen Aufbau entfernt [8]. Der *Strahlenverlauf* am Prisma wird meist oberflächlich gelernt; ohne ein tieferes Verständnis für die Lichtbrechung [9,10,11]. Für Lernende sind Brechung und Dispersion meist getrennte Begriffe [10]; manche verbinden Dispersion mit Reflexion oder einem opakem Medium [11].

Diese Erhebungen weisen jedoch einige Schwachpunkte seitens der Physikdidaktiker/innen selbst auf:

- Ähnlich wie die Lernenden *trennen* die Physikdidaktiker/innen oft zwischen Brechung und Dispersion, vgl. [3-5,9].
- Meist sind die Physikdidaktiker/innen auf das *Strahlenmodell* fixiert, vgl. [9-11]. Prismatische *Phänomene* werden kaum thematisiert.
- Auch die Physikdidaktiker/innen unterliegen *Fehlvorstellungen*. Sie erwarten zum Beispiel, dass ein weißes Lichtbündel nach zwei umgekehrten Prismen wieder als solches austritt [10]. Richtige Antworten werden dadurch als falsche bewertet und umgekehrt. Fragen zu Perspektivunterschieden und Farbsäumen bei der Inspektion durch ein Prisma fehlen, vgl. [3-5].

Deshalb führen wir eine Erhebung durch, bei der die Farbzerlegung und die Bildverrückung als Gesamtphänomen thematisiert werden.

2. Gegenstand der Erhebung

Ziel der Erhebung ist es, Vorstellungen von Schüler/innen der 7. Jahrgangsstufe zur Projektion und Inspektion durch ein Prisma zu erfassen. Vorstellungen sind gedankliche Prozesse; als solche sind sie wandelbar [12]. Die Vorstellungen werden im Rahmen des bewährten Modells der Didaktischen Rekonstruktion erhoben [13]. Demnach kommt es nicht auf die Häufigkeit, sondern auf das Wesen der Vorstellungen an [13]. Mit steigender Komplexität werden sie als *Begriffe*, *Konzepte*, *Denkfiguren* oder *Theorien* eingestuft und beschrieben [13].

Im Hinblick auf die didaktische Strukturierung in Form eines bildbasierten Zugangs zur Spektroskopie [14-16] stellen wir folgende Leitfragen:

- Welcher *Begriff* liegt dem Wort „Strahl“ zu Grunde?
- Mit welchen *Konzepten* werden Bilder untereinander und mit Strahlen in Bezug gesetzt?
- Mit welchen *Denkfiguren* werden prismatische Phänomene vorhergesagt oder nachvollzogen?

3. Methoden der Erhebung

Um einen Überblick über Präkonzepte von Siebtklässler/innen zu gewinnen, wurden *Fragebögen im offenen Format* verwendet. 19 Fragebögen zu Prismen (und Linsen) wurden in insgesamt zwei siebten Klassen ausgeteilt; hiervon wurden drei nicht bearbeitet ($N = 16$). Die Bearbeitungszeit betrug 45 Minuten. Die Schüler/innen hatten bereits die Schattenlehre und die Farbzerlegung von Sonnenlicht am Prisma behandelt, aber weder das Strahlenmodell, noch andere Prismenversuche kennengelernt.

Um einen tieferen Einblick zu erhalten und den Wandel der Präkonzepte bei einem bildbasierten Zugang zu untersuchen, wurden *leitfadengestützte, problemzentrierte Interviews* durchgeführt, vgl. [12]. Das Interview hatte zwei Prismenversuche zum Lerngegenstand: einerseits die Projektion eines Schwarzweißbildes eines Frauengesichts durch ein

Prisma, andererseits die Inspektion eines weißen Spielzeugautos und einer dahinter befindlichen weißen Streichholzschachtel mit buntem Logo durch ein Prisma. Bei beiden Versuchen wurden im Verlauf des Interviews Farbfilter hinzugefügt, um Einzelbilder innerhalb der Spektren zu offenbaren. Bei diesem Vermittlungsexperiment sollten die Schüler Beobachtungen vorhersagen, beschreiben und erklären, vgl. [17,18]. Der Interviewer lieferte Erklärungsansätze so spät und sparsam wie möglich. Eines der Interviews (30 Minuten) wurde mit einem Schüler durchgeführt; zwei andere Interviews (45 Minuten und 55 Minuten) wurden auf Nachfrage der Schüler mit je zwei Schülern durchgeführt. Die Interviews ($N = 5$) wurden videodokumentiert.

Durch die zwei unterschiedlichen Methoden der Erhebung sollte die Validität der Interpretation erhöht werden.

Die Fragebögen und Videotranskripte wurden gemäß der *didaktischen Version der Qualitativen Inhaltsanalyse* [12,19] ausgewertet. Zusammenhängende individuelle Konzepte wurden einer individuellen Denkfigur zugeordnet. Ähnlichkeiten zwischen individuellen Vorstellungen wurden als verallgemeinerte Vorstellung beschrieben [20].

4. Fragebogen-Ergebnisse

Im schriftlichen Teil wurden drei verschiedene Verwendungsmöglichkeiten für das Prisma genannt:

- *Farb-Erzeugung*: „Aus weißem Licht buntes machen“, „Regenbogen machen mit Licht [sic]“
- *Reflexion*: „zum reflektieren [sic]“
- *Durchsicht*: „zum durchkucken [sic]“

In den Zeichnungen zu den erwarteten Phänomenen erkennen wir bei der **Projektion** die Vorstellungen *Schatten-Bildung* (Abb. 1) und *Farb-Erzeugung* (Abb. 2). Bei der **Projektion und Inspektion** finden wir die Vorstellung *Reflexion* (Abb. 3) wieder. Bei der **Inspektion** treffen wir wieder auf die Vorstellung *Durchsicht* (Abb. 4). Zwar werden Bilder und Strahlen gezeichnet, sie werden aber nur lose miteinander verbunden, etwa im Konzept *Bild-begrenzende Strahlen* (Abb. 1(b), 2(b)) oder im Konzept *Bild-erzeugende Strahlen* (Abb. 2(c)) beziehungsweise *Extramission* (Abb. 3(b)).

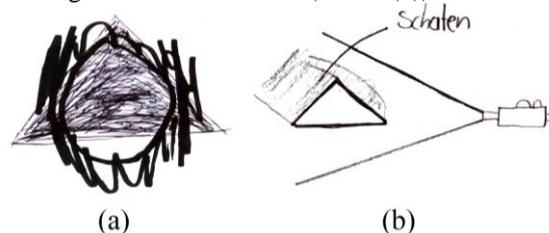


Abb. 1: Verallgemeinerte Vorstellung *Schatten-Bildung*. Bei Projektion eines weißen Kreises durchs Prisma erwarten Schüler (a) eine *Bild-Abschattung* oder (b) eine *Schattenraum-Bildung*, „weil das Licht [sic] nicht durch kann.“

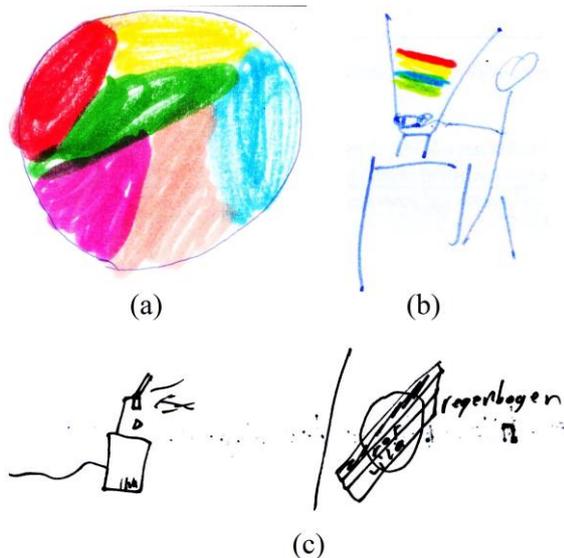


Abb. 2: Verallgemeinerte Vorstellung *Farb-Erzeugung*. Bei Projektion eines weißen Kreises durchs Prisma erwarten Schüler eine (a) *Farbige Bild-Unterteilung*, denn man kann „aus weißem Licht buntes machen“, (b) *Verwandlung zum Farbband*, „weil das Licht in seiner [sic] Ersatzteile [sic] zerteilt wird“, (c) *Farbband-Hinzugabe*, denn ein Prisma dient dazu „regenbogen [sic] zu erzeugen.“

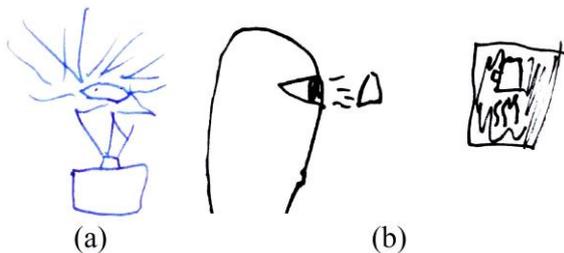


Abb. 3: Verallgemeinerte Vorstellung *Reflexion*. (a) Bei der Projektion eines weißen Kreises durch ein Prisma wird eine *Strahlen-Reflexion* erwartet; man kann ein Prisma „zum reflektieren [sic]“ verwenden. (b) Bei der prismatischen Inspektion einer weißen Tasse durch ein Prisma wird eine *Bild-Umkehr* erwartet: „Durch die spiegelung [sic] wirt [sic] das bild [sic] umgedreht.“ Die Ansatzpunkte der Strahlen deuten auf das Konzept der *Extramission*.

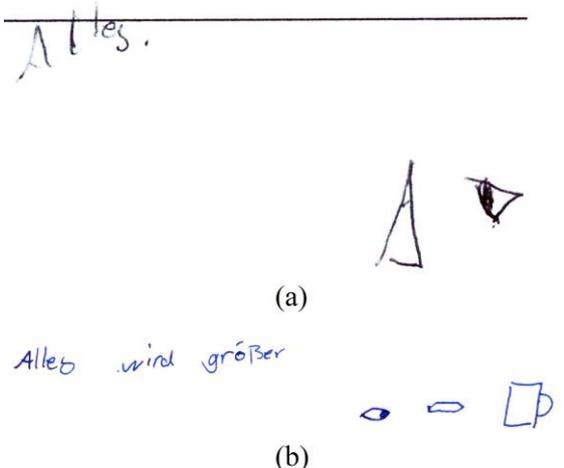


Abb. 4: Verallgemeinerte Vorstellung *Durchsicht*. Bei der Inspektion einer weißen Tasse durch ein Prisma wird je nach individueller Ausprägung dieser Vorstellung (a) eine *Bild-Erhaltung* oder (b) eine *Bild-Vergrößerung* erwartet.

Diesen Vorstellungen liegen unterschiedliche Begriffe vom **Lichtstrahl** zu Grunde:

- *Lichtgebilde*: „Ein Strahl [,] wo [sic] aus Licht besteht“, „Einnen [sic] Licht [sic] aus Licht“, „Ein Strahl aus Licht“, „Ein strahl [sic] aus UV-teilen [sic]“, „Ein langer gebündelter heller Strahl.“
- *Lichtbestandteil*: „Das[s] den [sic] ein Strahl ist vom Licht wo [sic] jetzt z.B. aufs Buch fällt.“

5. Interview-Ergebnisse

Vorhersagebezogene Konzepte (vor der Durchführung eines Teilversuchs) werden im **Futur** beschrieben. Nachvollziehende Konzepte (nach der Durchführung eines Teilversuchs), sowie Denkfiguren, werden im **Präsens** beschrieben. Je nachdem, wie die Lernenden die Angemessenheit beurteilen, werden die Konzepte mit Symbolen markiert, vgl. [12]:

- Vertretene Vorstellung
- ? Zweifelbehaftete Vorstellung
- △ ~~Abgelehnte Vorstellung~~
- ▽ Vertretene, aber später verworfene Vorstellung

Die Namen wurden zwecks Anonymität geändert.

5.1. Einzelstrukturierung Adam

Bei Adam findet man die Denkfiguren *Licht-Ablenkung* (Tab. 1, vgl. Abb. 1(b)) und *Bild-Einfärbung* (Tab. 2). Im Verlauf des Vermittlungsexperiments bildet er zudem die Denkfiguren *Bild-Verschwimmung* (Tab. 3), *Bilder-Überlagerung* (Tab. 4) und *Projektions-Analogismus* (Tab. 5) aus.

Das Prisma lenkt das Licht ab.	
Projektion	
•	Bild-ablenkendes Prisma: Am und im Prisma wird das Bild jeweils abgelenkt werden, ähnlich wie bei einem Spiegel.
•	Versetztes Bild: Das gefärbte Bild wird woanders erscheinen als das ursprüngliche Bild.
Inspektion	
•	Vervielfachung: Den Gegenstand wird man mehrfach sehen, weil das Prisma mehrere Flächen hat.
•	Spiegelndes Prisma: Im Prisma wird der Blick jeweils in eine andere Richtung gelenkt, weil im Prisma Spiegel sind.
•	Scheinbarer Gegenstands-Ort: Der Gegenstand erscheint in anderer Richtung hinter dem Prisma.
?	Extramission: Lichtstrahlen gehen vom Auge durch das Prisma (zum Gegenstand oder Bild).
?	Intromission: Lichtstrahlen gehen vom Gegenstand durch das Prisma zum Auge.

Tab. 1: Adams Denkfigur *Licht-Ablenkung*.

Die Farben im Prisma machen das Bild bunt.

- **Gefärbtes Bild:** Das Schwarzweißbild wird Regenbogenfarben bekommen.
- **Abfärbendes Prisma:** Das Innere vom Prisma mischt dem Schwarzweißbild Farben bei.

Tab. 2: Adams Denkfigur *Bild-Einfärbung*.

Die Prismenform macht das Bild verschwommen.**Projektion**

- **Verschwommenes Bild:** Das regenbogenfarbige Bild ist unscharf.
- △ **Unschärfe durch Färbung:** Die Unschärfe hat etwas mit den Farben zu tun.
- **Weichzeichnendes Prisma:** Die Form des Prismas macht das Bild unscharf.

Inspektion

- **Bewegungsunschärfe-Analogie:** Der Gegenstand erscheint unscharf, ähnlich wie bei einem verlangsamten Video.

Tab. 3: Adams Denkfigur *Bild-Verschwimmung*.

Verschieden gefärbte Bilder überlagern sich.**Projektion**

- **Freilegender Farbfilter:** Ein Filter legt den gleichfarbigen Bereich des regenbogenfarbigen Bildes frei.
- **Schmaleres Filterbild:** Der freigelegte Bereich ist schmaler als das regenbogenfarbige Bild.
- **Scharfes Filterbild:** Das gefilterte Bild ist scharf.
- **Gemischte Farbbereiche:** Die freigelegten Farbbereiche vermischen sich.

Inspektion

- **Abstandsabhängiger Bildversatz:** Der Versatz zwischen rotem und blauem Einzelbild ist bei nahen Gegenständen kleiner als bei fernen.
- **Gemischte Bilder:** Die verschiedenfarbigen Einzelbilder vermischen sich.

Tab. 4: Adams Denkfigur *Bilder-Überlagerung*.

Die Inspektion ähnelt der Projektion.

- **Buntes Bild:** Durch das Prisma sieht der Gegenstand bunt aus, wie bei der Projektion.
- **Verschobenes Bild:** Der Gegenstand erscheint verschoben, aber weniger als bei der Projektion.

Tab. 5: Adams Denkfigur *Projektions-Analogismus*.

Wenn Adam von „Reflexion“ spricht, meint er damit eine irgendwie geartete Ablenkung von Licht.

Adams Vorstellungen zur Projektion und Inspektion am Prisma liegt nur ein vager Strahlbegriff zu Grunde. Adam stellt sich Lichtstrahlen so *ähnlich wie Laserstrahlen* vor.

5.2. Einzelstrukturierung Flavio

Bei Flavio findet man die Denkfiguren *Licht-Spiegelung* (Tab. 6), *Bild-Färbung* (Tab. 7) und *Inspektions-Analogismus* (Tab. 8). Im Verlauf des Vermittlungsexperiments bildet er wie Adam die Denkfigur *Bilder-Überlagerung* (Tab. 4) aus.

Das Prisma spiegelt das bildführende Licht.**Projektion**

- **Spiegelndes Prisma:** Im und am Prisma wird das Licht gespiegelt werden.
- ▽ **Konstanter Bildort:** Das regenbogenfarbige Bild wird am Ort des Schwarzweißbildes sein.
- **Versetztes Bild:** Das regenbogenfarbige Bild ist an einem anderen Ort als das Schwarzweißbild.
- **Verschwommenes Bild:** Das regenbogenfarbige Bild ist unscharf.
- **Spiegelungsbedingte Unschärfe:** Spiegelungen im Prisma machen das Bild unscharf.
- ▽ **Farbunabhängiger Bildort:** Das Prisma versetzt das Bild für alle Farben gleich stark.

Inspektion

- **Spiegelndes Prisma:** Im und am Prisma wird das Licht beziehungsweise Bild gespiegelt.
- ▽ **Wand-Bild:** Bei einäugiger Sicht wird es so wirken, als ob der Gegenstand an der Wand ist.
- **Scheinbarer Gegenstandsort:** Der Gegenstand erscheint in anderer Richtung hinterm Prisma.
- △ **Extramission:** ~~Strahlen gehen vom Auge zum Prisma.~~
- **Intromission:** Strahlen gehen vom Prisma zum Auge.
- **Bildführende Lichtstrahlen:** Das Bild geht entlang der gespiegelten Lichtstrahlen.

Tab. 6: Flavios Denkfigur *Licht-Spiegelung*.

Das Bild bekommt Farben.

- **Gefärbtes Bild:** Das Schwarzweißbild wird Regenbogenfarben bekommen.
- △ **Abfärbendes Prisma:** ~~Das Innere vom Prisma mischt dem Schwarzweißbild Farben bei.~~
- ▽ **Abfärbende Umgebung:** Gegenstände in der Umgebung färben auf das Schwarzweißbild ab.

Tab. 7: Flavios Denkfigur *Bild-Färbung*.

Auch Flavio stellt sich Lichtstrahlen *ähnlich wie Laserstrahlen* vor. Allerdings seien Lichtstrahlen nur manchmal und *nicht direkt zu sehen*, sondern nur, wenn sie an einem Gegenstand gestreut werden.

Die Projektion ähnelt der Inspektion.
<ul style="list-style-type: none"> • Gefärbtes Bild: Das Schwarzweißbild wird regenbogenfarbig werden, denn beim Blick ins Prisma sieht man Farben. • Spiegelndes Prisma: Das Prisma wird das Schwarzweißbild spiegeln, denn beim Blick ins Prisma sieht man die Umgebung gespiegelt.

Tab. 8: Flavios Denkfigur *Inspektions-Analogismus*.

5.3. Einzelstrukturierung Oliver

Das Prisma lenkt das bilderzeugende Licht ab.
Inspektion
<ul style="list-style-type: none"> ∇ Normale Durchsicht: Durch das durchsichtige Prisma wird der Gegenstand normal aussehen. • Innere Strahl-Ablenkung: Das Innere vom Prisma lenkt die Lichtstrahlen ab. • Ablenkungsbedingte Farben: Die Farben entstehen durch die Strahl-Ablenkung im Prisma.
Projektion
<ul style="list-style-type: none"> • Äußere Strahl-Ablenkung: Die Außenseite vom Prisma lenkt die Lichtstrahlen ab. Δ Eindringende Strahlen: In das Prisma dringen Lichtstrahlen ein. • Ablenkungsbedingte Bildverrückung: Durch die Strahl-Ablenkung ist das Bild verschoben. ? Ablenkungsbedingte Unschärfe: Durch die Strahl-Ablenkung ist das Bild unscharf.

Tab. 9: Olivers Denkfigur *Strahl-Ablenkung*.

Das Bild wird mit Farben hinterlegt.
Inspektion
<ul style="list-style-type: none"> • Hinzugefügte Farben: Zusätzlich zum Gegenstand tauchen Regenbogenfarben auf. • Farbenentfernender Filter: Ein Filter wird alle bis auf eine der Regenbogenfarben entfernen, so dass alles einfarbig scharf aussehen wird. ∇ Farbunabhängiger Bildort: Der Gegenstand erscheint mit jedem Farbfilter am selben Ort.
Projektion
<ul style="list-style-type: none"> • Buntes Bild: Das durchs Prisma projizierte Bild wird bunt erscheinen. ∇ Farbunabhängige Unschärfe: Über die Farben legt sich das unscharf gemachte Bild. ? Farbenbedingte Unschärfe: Durch Hinterlegung mit den unterschiedlichen Farben wirkt das scharfe Bild unscharf.

Tab. 10: Olivers Denkfigur *Farben-Hinterlegung*.

Das Prisma erzeugt ein vergrößertes Bild.
Inspektion
<ul style="list-style-type: none"> • Vergrößerte Ansicht: Der Gegenstand wirkt durch das Prisma betrachtet größer.
Projektion
<ul style="list-style-type: none"> ? Vergrößertes Bild: Das Prisma wird das projizierte Bild vergrößern, ähnlich, wie man bei der Inspektion beobachten kann.

Tab. 11: Olivers Denkfigur *Bild-Vergrößerung*.

Olivers Vorstellungen bewegen sich innerhalb der drei Denkfiguren *Strahl-Ablenkung* (Tab. 9), *Farben-Hinterlegung* (Tab. 10, vgl. Abb. 2(b)) und *Bild-Vergrößerung* (Tab. 11). Für Olivers Begriff sind Strahlen unsichtbare—da *durchsichtige und farblose*—Lichtbestandteile mit *hellmachender und Bilderzeugender* Wirkung.

5.4. Einzelstrukturierung Thanh

Bei Thanh finden wir die Denkfiguren *Farb-Verwandlung* (Tab. 12), *Licht-Spiegelung* (Tab. 13 und Abb. 5(a)), *Wellen-Bildung* (Tab. 14), *Bild-Überlagerung* (Tab. 15 und Abb. 5(b)) und *Knickung* (Tab. 16). Für Thanh sind Strahlen *mechanistische, Bild-tragende Lichtgebilde*. Wenn Thanh davon redet, dass farbige Lichter „gebrochen“ werden, meint er damit, dass sie „ineinander gehen“.

Das Prisma verwandelt die Farben.
<ul style="list-style-type: none"> • Veränderte Farben: Das Prisma wird Farbigen andersfarbig machen; so, wie es aus weißem Licht farbiges machen wird. ∇ Kollisionsbedingte Farbentstehung: Die Farben werden entstehen, weil Strahlen im Prisma aufeinanderprallen und sich vermengen werden.

Tab. 12: Thanh's Denkfigur *Farb-Verwandlung*.

Das Prisma spiegelt das bildtragende Licht.
Inspektion
<ul style="list-style-type: none"> • Indirekte Sicht: Man wird die seitlich befindlichen Gegenstände sehen. ? Prismatische Einspiegelung: Über das Prisma wird etwas anderes eingespiegelt werden.
Projektion
<ul style="list-style-type: none"> • Spiegelndes Glas: Das gläserne Prisma spiegelt, weil Glas spiegelt. ∇ Spiegelungsbedingte Bildverrückung: Das verschobene Bild entsteht dadurch, dass die Strahlen im Prisma gespiegelt werden.

Tab. 13: Thanh's Denkfigur *Licht-Spiegelung*.

Die Unschärfe entsteht durch Verwellung.
<ul style="list-style-type: none"> ▽ Verwelltes Licht: Die Unschärfe entsteht, da das Licht vom Gegenstand beim Aufprallen an den Prismenwänden eine Wellenform bekommt. ▽ Verwellte Farben: Die Unschärfe entsteht, da die neuen Farben eine Wellenform bekommen.

Tab. 14: Thanks Denkfigur *Wellen-Bildung*.

Mehrere Bilder überlagern sich.
Inspektion
<ul style="list-style-type: none"> ▽ Farbenbedeckte Unschärfe: Über ein verschwommenes Bild legen sich Farben. ▽ Unscharfe Farbbedeckung: Über ein scharfes Bild legen sich verschwommene Farben. • Farbenentfernender Filter: Ein Farbfilter beseitigt bestimmte Farben.
Projektion
<ul style="list-style-type: none"> ▽ Unscharfe Farbbedeckung: Über ein scharfes Bild legen sich verschwommene Farben. ▽ Bilderbedecktes Bild: Verschiedenfarbige, scharfe Bilder bedecken das Schwarzweißbild. • Ersetztes Bild: Eine Reihe von verschiedenfarbigen, scharfen Bildern ersetzt das Schwarzweißbild und ergibt das unscharfe, bunte Bild. ▽ Versetzt startende Strahlen: Die roten und blauen Strahlen kommen versetzt ins Prisma.

Tab. 15: Thanks Denkfigur *Bild-Überlagerung*.

Der Knick am Prisma knickt alles.
Inspektion
<ul style="list-style-type: none"> • Prismen-Knick: Das Prisma hat einen Knick. ▽ Bildwärtig abknickende Strahlen: Strahlen vom Gegenstand knicken zum Bild hin ab. ? Augwärtig abknickende Strahlen: Strahlen vom Gegenstand knicken zum Auge hin ab. △ Extromission: Vom Auge gehen Lichtstrahlen über das Prisma zum Gegenstand.
Projektion
<ul style="list-style-type: none"> • Strahlen-Knick: Die Strahlen bekommen am Prismen-Knick einen Knick. ▽ Bilder-Knick: Die überlagerten Bilder bekommen im Prisma einen Knick in der Mitte. ▽ Knickbedingter Versatz: Durch den Bilder-Knick entsteht der gegenseitige Versatz. • Versetzt abknickende Strahlen: Rote und blaue Strahlen knicken am Prisma versetzt ab.

Tab. 16: Thanks Denkfigur *Knickung*.

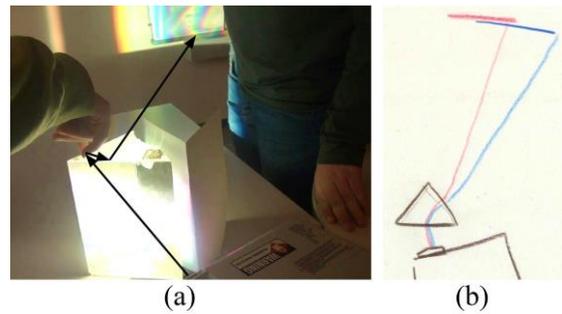


Abb. 5: Thanks Konzepte zu Strahlen bei der Projektion. (a) Zuerst zeigt er *Spiegelungsbedingte Bildverrückung*. (b) Später zeichnet er *Versetzt abknickende Strahlen*.

5.5. Einzelstrukturierung Indigo

Indigo nutzt die Denkfiguren *Strahlen-Mix* (Tab. 17), *Bild-Verwerfung* (Tab. 18), *Licht-Spiegelung* (Tab. 19 und Abb. 6), und *Farben-Versatz* (Tab. 20 und Abb. 6). Strahlen sind *mechanistische, Bildtragende Lichter*.

Das Prisma mixt Farben.
Inspektion
<ul style="list-style-type: none"> • Veränderte Farben: Das Prisma wird die Farben verändern. • Reflexionsbedingter Mix: Die im Prisma reflektierten Strahlen werden gemixt werden. • Verfärbender Filter: Mit Filter wird alles einen Farbstich bekommen. • Farbenentfernender Filter: Ein Farbfilter beseitigt bestimmte Farben. • Effektiver Filterstapel: Ein Stapel verschiedenfarbiger Filter beseitigt noch mehr Farben.
Projektion
<ul style="list-style-type: none"> • Gefärbtes Bild: Das Bild wird farbig werden. • Reflexionsbedingter Mix: Die im Prisma reflektierten Strahlen werden gemixt werden. ? Abknickungsbedingte Farbentstehung: Beim Abknicken der Strahlen im Prisma entstehen neue Farben. ▽ Unscharfe Farbbedeckung: Über das scharfe Bild legen sich verschwommen gemixte Farben.

Tab. 17: Indigos Denkfigur *Strahlen-Mix*.

Am Prisma verwirft sich das Schwarzweißbild.
Inspektion
<ul style="list-style-type: none"> • Verworfenes Bild: Das Bild wird auf die Prismenecke geworfen und dabei unscharf verzerrt.
Projektion
<ul style="list-style-type: none"> • Farbenbedeckte Unschärfe: Auf das verworfene Schwarzweißbild werden verschiedenfarbige scharfe Bilder geworfen.

Tab. 18: Indigos Denkfigur *Bild-Verwerfung*.

Das Prisma spiegelt das bildtragende Licht.	
Inspektion	
<ul style="list-style-type: none"> ▽ Vervielfachtes Bild: Mehrere Prismenflächen werden den Gegenstand mehrfach einspiegeln. • Normales Spiegelbild: In der Seitenfläche erscheint ein normales Spiegelbild. • Indirekte Sicht: Man sieht die seitlich befindlichen Gegenstände. ▽ Bildwärtig reflektierte Strahlen: Strahlen vom Gegenstand werden zum Bild hin reflektiert. • Augwärtig abgelenkte Strahlen: Strahlen vom Gegenstand werden zum Auge abgelenkt. 	
Projektion	
<ul style="list-style-type: none"> • Spiegelungsbedingte Bildverrückung: Das bunte Bild ist woanders als das ursprüngliche, da die Strahlen im Prisma gespiegelt werden. 	

Tab. 19: Indigos Denkfigur *Licht-Spiegelung*.

Farben kommen versetzt aus dem Prisma.	
Inspektion	
<ul style="list-style-type: none"> • Farbränder: Weiße Gegenstände bekommen rote und blaue Ränder. • Beidseitig versetzte Strahlen: Rote und blaue Strahlen treten am Prisma versetzt ein und aus. 	
Projektion	
<ul style="list-style-type: none"> • Versetzte Bilder: Das rote und blaue Filterbild sind gegeneinander versetzt. • Verbreitertes Bild: Die versetzt überlagerten Bilder ergeben ein unscharf verbreitertes Bild. • Einseitig versetzte Strahlen: Rote und blaue Strahlen treten am Prisma versetzt aus. 	

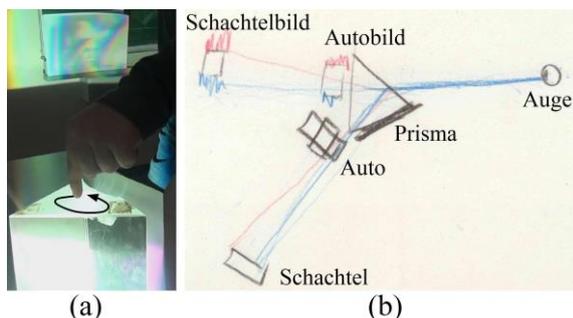
Tab. 20: Indigos Denkfigur *Farben-Versatz*.

Abb. 6: Indigos Konzepte zum Strahlengang. (a) *Reflexionsbedingter Mix* bei der Projektion. (b) Für die Inspektion zeichnet er zuerst *Bildwärtig reflektierte Strahlen* und nach Diskussion *Augwärtig abgelenkte Strahlen*.

5.6. Ergänzende Bemerkungen

Manche Filterbilder wurden im Vergleich zum Spektrum als nicht schärfer angesehen; Perspektivunterschiede zwischen den roten und blauen Bildern wurden bei der Inspektion nur auf Hinweis erkannt.

6. Verallgemeinerte Vorstellungen

Im Folgenden verallgemeinern wir die Ergebnisse der Fragebögen und Interviews mit Blick auf thematische Schwerpunkte.

6.1. Verallgemeinerte Begriffe

Zum Wort „Strahl“

- a) **Lichtgebilde:** Ein Strahl ist ein Gebilde aus Licht (analog zum Wasserstrahl).
- b) **Lichtbestandteil:** Ein Strahl ist ein Bestandteil des Lichts (analog zu Newtons Definition).

6.2. Verallgemeinerte Konzepte

Zur Bild-Färbung

- a) **Gefärbtes Urbild:** Farben werden dem scharfen Bild hinzugefügt.
- b) **Gefärbtes Zerrbild:** Farben werden dem unscharf verzerrten Bild hinzugefügt.
- c) **Überlagerte Bilder:** Verschiedenfarbige Bilder überlagern sich.

Zur Bild-Unschärfe

- a) **Ablenkungsbedingte Unschärfe:** Lichtablenkungen im Prisma machen das Bild unscharf.
- b) **Farbenbedingte Unschärfe:** Hinzugefügte Farben machen das scharfe Bild unscharf.
- c) **Bilderbedingte Unschärfe:** Scharfe Bilder überlagern sich zu einem unscharfen Bild.

Zur Filter-Wirkung

- a) **Hinzufügender Filter:** Ein Filter fügt überall eine bestimmte Farbe hinzu.
- b) **Beseitigender Filter:** Ein Filter beseitigt überall bestimmte Farben.

Zur Prisma-Wirkung

- a) **Spiegelndes Prisma:** An den Prismenflächen wird das Licht gespiegelt.
- b) **Brechendes Prisma:** An den Prismenflächen wird das Licht gebrochen.
- c) **Durchsichtiges Prisma:** Das Prisma lässt Licht durch.
- d) **Schattenbildendes Prisma:** Das beleuchtete Prisma bildet einen Schatten.
- e) **Vergrößerndes Prisma:** Das Prisma macht das Bild größer.
- f) **Unscharf machendes Prisma:** Das Prisma macht das Bild verschwommen.
- g) **Farbveränderndes Prisma:** Das Prisma verändert die Farbwirkung des Lichts.

Zur Farb-Änderung

- a) **Beigemischte Farben:** Das Prisma fügt dem eintretenden Licht Farben hinzu.
- b) **Vermischte Farben:** Das Prisma vermischt die eintretenden farbigen Lichter.
- c) **Entmischte Farben:** Das Prisma entmischt die eintretenden farbigen Lichter.

Zum Sehen

- a) **Extramission:** Licht kommt aus dem Auge.
- b) **Intromission:** Licht geht in das Auge.

Zum Strahlengang für das virtuelle Bild

- a) **Bildseitiger Strahlengang:** Strahlen befinden sich zwischen Prisma und Gegenstand sowie zwischen Prisma und dem Bild dahinter.
- b) **Augseitiger Strahlengang:** Strahlen befinden sich zwischen Gegenstand und Prisma sowie zwischen Prisma und Auge.

6.3. Verallgemeinerte Denkfiguren

Zur Dispersions-Bedingung

- a) **Spiegelungsbedingte Dispersion:** Das gefärbte Bild beruht auf Spiegelung.
- b) **Ablenkungsbedingte Dispersion:** Das gefärbte Bild beruht auf irgendeiner Art Ablenkung.

Zur Abbildung bei der Projektion

- a) **Holistischer Bild-Transport:** Strahlen tragen das Bild zum Schirm.
- b) **Holistische Bild-Erzeugung:** Strahlen malen das Bild auf den Schirm.

Zur Abbildung bei der Inspektion

- a) **Holistischer Bild-Transport:** Strahlen tragen das Bild zum Auge.
- b) **Holistische Objekt-Erfassung:** Strahlen vom Auge erfassen den Gegenstand.
- c) **Holistische Bild-Erfassung:** Strahlen vom Auge erfassen das Bild.

7. Diskussion

Anhand von Fragebögen und Interviews haben wir Schülervorstellungen zu prismatischen Phänomenen herausgearbeitet. Im Abgleich mit bisherigen Studien [3-12] scheinen die Ergebnisse ähnlich (vgl. Einleitung), aber umfangreicher und detailreicher.

Die Lernenden deuten die Wirkung des Prismas vor dem Hintergrund ihres Vorwissens zu Schatten und Spiegeln. Deshalb können viele dem Prisma nicht ansehen, dass oder wie es das Licht bricht. Umgekehrt haben Physikdidaktiker/innen–mich eingeschlossen–die Schattenbildung und Spiegelung am Prisma bisher wohl vernachlässigt.

In den Vermittlungsexperimenten haben wir unterrichtlich bedeutsame Erfahrungen gesammelt: Erstens deuteten die Schüler ein Phänomen anders als der Lehrer und bemerkten oder übersahen weitere Phänomene. Zweitens meinten manche Schüler mit den Worten ‚Reflexion‘ und ‚Brechung‘ etwas anderes als der Lehrer (Abschnitte 5.1 und 5.4). Drittens wechselten die Schüler über den bildbasierten Zugang zu neuen Konzepten, blieben aber oft in ihrer alten Denkfigur, vgl. Tab. 6, Tab. 10 und Tab. 19.

Streng genommen sind Präkonzepte jedoch unzugänglich. Die Ergebnisse dieser Untersuchung stellen vielmehr eine Deutung der Schüleraussagen dar: Wir können die Worte und Bilder des Gegenübers nur auf der Grundlage unserer eigenen Vorstellungen verstehen (*Hermeneutischer Zirkel*) [12] und müssen zumindest zeitweise von unseren eigenen

Vorstellungen zu denen des Gegenübers übergehen (*Konzeptwechsel*). Hierbei kann es zu Missverständnissen kommen. Zudem könnten andere Didaktiker/innen die Vorstellungen anders strukturieren, da die Qualitative Inhaltsanalyse [12,19] große Spielräume in der Deutung und Darstellung offenlässt. So lässt sich ein Konzept oft mehreren Denkfiguren zuordnen; zwecks Bündigkeit haben wir darauf verzichtet. Überdies bedarf die didaktische Version der Qualitativen Inhaltsanalyse einer **konstruktivistischen Begründung** und **methodologischen Ausschärfung** beim Schritt der Verallgemeinerung [20].

Um die Ergebnisqualität weitestgehend zu sichern, haben wir gewöhnliche Schülerinnen und Schüler befragt (*Auswahlgültigkeit*) und unsere Ergebnisse mit Ergebnissen anderer Schülerbefragungen sowie einer vorläufigen fachlichen Klärung abgeglichen (*Korrelative Gültigkeit*), vgl. [12]. Zudem haben wir auf die *Verfahrensgültigkeit* geachtet, vgl. [12]: Erstens haben wir die Qualitative Inhaltsanalyse Schritt für Schritt durchgeführt (*Schrittweises Vorgehen*). Zweitens haben wir alle Schritte dokumentiert (*Verfahrensdokumentation*). Drittens sind unsere Deutungen des Datenmaterials durch Begründungen gestützt (*Argumentative Interpretationsabsicherung*). Viertens haben wir in den Interviews eine wertschätzende Situation geschaffen (*Mitwirkung der Interviewpartner*). Fünftens haben wir mehrere Fragezugänge (zur Funktion eines Prismas, zu Phänomenen, Rückfragen) und verschiedene Darstellungsebenen (Versuchsaufbau abwandeln, zeigen; zeichnen; schreiben, sprechen) genutzt (*Interne methodologische Triangulation*). Die Auswertung sollte noch von qualifizierten Personen überprüft werden (*Kontrolliertes Vorgehen*), vgl. [12].

Die Liste der verallgemeinerten Vorstellungen ist sicher nicht vollständig: Bei weiteren Untersuchungen wird man auf weitere Vorstellungen treffen. Ähnlich wie in anderen Studien zur didaktischen Rekonstruktion haben wir nur wenige Schüler interviewt. Trotzdem enthält die Liste anscheinend wesentliche Vorstellungen, weil wir einerseits verschiedene Vorstellungen bei ein und demselben Schüler erfasst haben (*Intraindividuelle Variabilität* [12]) und andererseits ähnliche Vorstellungen bei verschiedenen Schülern bemerkt haben (*Intersubjektive Uniformität* [12]). Zumindest ist die Liste insofern vollständig, als wir die bisher dokumentierten Schüleräußerungen damit nachvollziehen können.

8. Ausblick

Die Liste verallgemeinerter Vorstellungen zur Projektion und Inspektion durch ein Prisma kann 1) beim weiteren qualitativen oder quantitativen Erfassen der Schülerperspektive leitend sein, 2) bei der fachlichen Klärung als Suchraster dienen und 3) bei der didaktischen Strukturierung und Durchführung von schülerorientiertem Unterricht hilfreich sein.

9. Danksagung

Ich bedanke mich bei der Lehrerin Eva Drescher und dem Lehrer Karsten Maluck, die die Befragungen ermöglicht haben, sowie bei den Schüler/innen der Gesamtschule Bergatreute, die teilgenommen haben. Ich danke Prof. Dr. Theilmann für die Gespräche über die Verallgemeinerung von Vorstellungen sowie für seine Kommentare zum fast fertigen Manuskript. Beim Mitbegründer des Modells der Didaktischen Rekonstruktion, Prof. Dr. Harald Gropengießer, bedanke ich mich für die Beantwortung meiner Fragen zur Verallgemeinerung. Dank geht auch an Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner, der mir seinen Artikel [6] zugeschickt hat. Für die Begutachtung bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Helmuth Grötzebauch. Henriette Bast danke ich für das Korrekturlesen.

10. Literatur

- [1] Newton, Isaac (1671): A letter [...] containing his new theory of light and colors [...]. In: Philos. Trans. 6, S. 3075-3087
- [2] Goethe, Johann Wolfgang von (1979): Farbenlehre. Band 3. Hrsg. von Ott, Gertrud und Proskauer, Heinrich Oskar. Stuttgart: Freies Geistesleben
- [3] Galili, Igal; Bendall, Sheron; Goldberg, Fred (1993): The effects of prior knowledge on understanding image formation. In: J. Res. Sci. Teach. 30, S. 271-301
- [4] Galili, Igal; Hazan, Amnon (2000): Learners' knowledge in optics: interpretation, structure and analysis. In: Int. J. Sci. Educ. 22, 1, S. 57-88
- [5] Galili, Igal (1996): Students' conceptual change in geometrical optics. In: Int. J. Sci. Educ. 18, 7, S. 847-868
- [6] Wiesner, Hartmut (1986): Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten im Bereich der Optik. In: NiU-P/C 34, 13, S. 25-29
- [7] Fehringer, Iris (2013): Erstellung, Evaluation und Re-Design von forschungsbasierten Unterrichtsmaterialien zum Thema Farbenlehre in der Sekundarstufe 1. Diplomarbeit, Universität Wien
- [8] Ivanjek, Lana (2012): An investigation of conceptual understanding of atomic spectra among university students. Dissertation, Kroatien
- [9] Mestre, Jose P.; Ross, Brian H.; Brookes, David T.; Smith, Adam D.; Nokes, Timothy J. (2009): How cognitive science can promote conceptual understanding in physics classrooms. In: Saleh, Issa M.; Khine, Myint Swe: Fostering scientific habits of mind: Pedagogical knowledge and best practices in science education. Rotterdam: Sense Publishers, S. 145-171
- [10] Singh, Amarjit; Butler, Philip H. (1990): Refraction: Conceptions and knowledge structure. In: Int. J. Sci. Educ. 12, 4, S. 429-442
- [11] Palacios, F. Javier Perales; Cazorla, Francisco Nievas; Madrid, Agustin Cervantes (1989): Misconceptions on geometric optics and their association with relevant educational variables. In: Int. J. Sci. Educ. 11, 3, S. 273-286
- [12] Gropengießer, Harald (2007): Didaktische Rekonstruktion des Sehens – Wissenschaftliche Theorien und die Sicht der Schüler in der Perspektive der Vermittlung. Nachdruck der 2. überarbeiteten Auflage. Oldenburg: Didaktisches Zentrum
- [13] Kattmann, Ulrich; Duit, Reinders; Gropengießer, Harald; Komorek, Michael (1997): Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. In: ZfDN 3, 3, S. 3-18
- [14] Grusche, Sascha (2015): Ein bildbasierter Zugang zu spektroskopischen Versuchen. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1-9, Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/633/764>
- [15] Grusche, Sascha (2015): Revealing the nature of the final image in Newton's *experimentum crucis*. In: Am. J. Phys. 83, 7, S. 583-589
- [16] Grusche, Sascha (2016): Spielfilm auf Spaghetti: Spektrale Bildprojektion. In: PiuZ, 47, 4, S. 180-184
- [17] Duit, Reinders; Komorek, Michael; Wilbers, Jens (1997): Studien zur Didaktischen Rekonstruktion der Chaostheorie. In: ZfDN 3, 3, S. 19-34
- [18] Stavrou, Dimitrios; Komorek, Michael; Duit, Reinders (2005): Didaktische Rekonstruktion des Zusammenspiels von Zufall und Gesetzmäßigkeit in der nichtlinearen Dynamik. In: ZfDN 11, S. 147-164
- [19] Gropengießer, Harald (2005): Qualitative Inhaltsanalyse in der fachdidaktischen Lehr-Lernforschung. In: Mayring, Philipp; Gläser-Zikuda, Michaela (Hrsg.): Die Praxis der Qualitativen Inhaltsanalyse. Weinheim; Basel: Beltz, S. 172-189
- [20] Gropengießer, Harald; Institut für Didaktik der Naturwissenschaften (IDN), Leibniz-Universität Hannover (E-Mail-Kommunikation über „Fragen zu Konzepten und Denkfiguren“ vom 23.04.-04.05.2016)