

Präkonzepte zur Projektion eines unscharfen Bildes mit einer Linse

Sascha Grusche*

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

Kurzfassung

Die Linsenabbildung gehört zu den Standardthemen des Optikunterrichts. Bei der Entwicklung von Unterrichtskonzepten müssen die Präkonzepte der Lernenden berücksichtigt werden. Präkonzepte zur Linsenabbildung sind bereits mehrfach erhoben worden. Allerdings bezogen sich diese Studien stets auf die Erzeugung eines scharfen Bildes. Der allgemeine und ebenso alltagsrelevante Fall, nämlich die Erzeugung eines unscharfen Bildes, wurde indes vernachlässigt. Um Präkonzepte zur Projektion eines unscharfen Bildes zu erheben, wurden schriftliche und mündliche Befragungen durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse können der Lehrperson als Grundlage dienen, um lernernahen Unterricht zur Linsenabbildung zu planen.

1. Einleitung

Es ist erstaunlich, über welche Vorstellung ein Siebtklässler schon vor dem Unterricht zur Linsenabbildung verfügen kann:

„Wen[n] man beim fotografieren [sic] scharf stellt auf die vordere Person [...], ist die hintere unscharf und so auch andersrum“ (siehe Abschnitt 4).

An solch ein Präkonzept zur Linsenabbildung können wir im Unterricht wunderbar anknüpfen. Nicht immer jedoch stimmen die Präkonzepte der Schüler/innen mit den Vorstellungen der Wissenschaftler/innen überein. Bekannte Präkonzepte tragen wir im Folgenden zusammen.

Schüler/innen deuten die Linse als optisches Element, das die Lichtrichtung ändert, das Licht sammelt oder zerstreut, aus Glas besteht, scharf stellt, heranholt oder auftrennt, beim Sehen hilft, spiegelt, die Lichtenergie erhöht, oder auch die Lichtgeschwindigkeit erhöht [1]. Anfangs nutzen Schüler/innen eine *holistische* Denkfigur [2-5]: Das Bild löst sich vom Gegenstand ab, bewegt sich zur Linse, wird dort umgedreht und geht dann bis zum Schirm. Gemäß dieser Denkfigur entsteht mit einer halben Linse ein halbes Bild [2-5,6-8] und ohne Linse trotzdem ein Bild [2,7,9]. Im Optikunterricht lernen Schüler/innen die wissenschaftliche *Punkt-zu-Punkt*-Denkfigur kennen [3]. Demnach gehen von jedem Gegenstandspunkt Strahlen aus, die hinter oder vor einer Linse im zugehörigen Bildpunkt zusammenlaufen. Nach dem Optikunterricht verfügen viele Schüler/innen über eine *hybride* Denkfigur [2-5,10,11]: Ein Lichtstrahl trägt jeweils einen Bildpunkt vom Gegenstand zum Schirm. Eine halbe Linse lässt nur Strahlen von einer Gehalftshälfte durch und erzeugt somit ein halbes Bild; die ganze Linse kehrt die Reihenfolge der Strahlen um und

somit auch das Bild [2]. Manche Schüler/innen stellen sich den Strahlengang bei der Linse so ähnlich vor wie bei der einfachen Lochkamera [10]. Viele denken, dass das Bild stets im Brennpunkt entsteht [12]. Wenn Schüler/innen die Konstruktion von Parallel-, Mittelpunkt- und Brennpunktstrahlen kennengelernt haben, fällt es ihnen meist schwer, darin das Brechungsgesetz zu erkennen [9,13] oder damit Bildeigenschaften vorherzusagen [6,7,9]. Zudem deuten sie Strahlen oft als körperliche Dinge, nicht als geometrische Linien, mit denen man die Lichtausbreitung andeutet [5,7]. Bewegt man den Schirm hinter der Linse vor und zurück, erwarten die Schüler/innen, dass das Bild kleiner oder größer wird, aber nicht, dass es unsichtbar oder unscharf wird [2-4,7,11]. Wie die Schüler/innen die Unschärfe erklären, wurde bisher nur nach diesbezüglichem Unterricht erhoben [4].

Obwohl Präkonzepte zur Linsenabbildung seit über drei Jahrzehnten erhoben werden, sind keine Präkonzepte zur unscharfen Linsenabbildung bekannt. Die Erzeugung eines unscharfen Bildes ist jedoch alltagsrelevant und könnte das Verständnis der Linsenabbildung fördern. Deshalb erheben wir Präkonzepte zur unscharfen Linsenabbildung.

2. Gegenstand der Erhebung

Ziel der Erhebung ist es, vorunterrichtliche Vorstellungen von Schüler/innen der 7. Jahrgangsstufe zur unscharfen Linsenabbildung zu erfassen. Vorstellungen sind gedankliche Vorgänge und somit veränderlich [14]. Die Vorstellungen erheben wir gemäß dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion [15]. Es geht weniger darum, wie oft eine Vorstellung auftritt, sondern vielmehr darum, welche Arten von Vorstellungen es gibt. Unabhängig davon unterscheidet man Vorstellungen in ihrer Komplexität:

Strukturell einfache *Begriffe* werden in Form von *Konzepten* miteinander verbunden, zusammenhängende Konzepte und Begriffe wiederum bilden eine *Denkfigur* [14].

Da wir eine didaktische Strukturierung des Themas Linsenabbildung in Form eines *bildbasierten Zugangs* [16] anstreben, sind folgende Fragen leitend:

- Welcher *Begriff* liegt dem Wort „Strahl“ zu Grunde?
- Anhand welcher *Konzepte* werden Bilder untereinander und mit Strahlen in Bezug gesetzt?
- In welchen *Denkfiguren* wird die Linsenabbildung vorhergesagt oder nachvollzogen?

3. Methoden der Erhebung

Für einen ersten Überblick über die Präkonzepte wurden 19 *Fragebögen mit offenen und geschlossenen Fragen* zu Linsen (und Prismen) in zwei siebten Klassen ausgeteilt. Ein Teil des Bogens bestand aus den Fragen ‚ZKL‘ und ‚HAL‘ eines bereits erprobten Bogens [8]. Die Schüler/innen hatten 45 Minuten zur Bearbeitung. Drei Bögen blieben unausgefüllt ($N = 16$). Die Schüler/innen hatten im Physikunterricht bereits die Schattenlehre und prismatische Farbzerlegung kennengelernt, aber weder das Strahlenmodell, noch die Linsenabbildung behandelt.

Für einen tieferen Einblick in die Präkonzepte und deren Wandel bei einem bildbasierten Zugang wurden *leitfadengestützte, problemzentrierte Interviews* durchgeführt, vgl. [14]. Das Interview kreiste um zwei Teilversuche zur Linsenabbildung eines Spielzeugautos im Vordergrund und einer Streichholzschachtel im Hintergrund. Im ersten Teil des Versuchs sollten die Schüler vorhersagen, beschreiben und erklären, was auf dem beweglichen Schirm zu sehen ist - nämlich ein teils scharfes, teils unscharfes Bild. Im zweiten Teil sollten sie vorhersagen, beschreiben und erklären, was mit einer Löcherblende an der Linse auf dem Schirm zu sehen ist - nämlich eine Anordnung von Einzelbildern. Bei diesem Vermittlungsexperiment (im Sinne einer Lehrprobe, vgl. [17,18]) lieferte der Versuchsleiter Erklärungsansätze so spät und wenig wie möglich. Drei Interviews (Dauer: 31 min, 45 min, 40 min) wurden auf Nachfrage der Schüler mit je zwei Schülern durchgeführt ($N = 6$) und mit einer Digitalkamera gefilmt.

Die Fragebögen und Videotranskripte wurden gemäß der *didaktischen Version der Qualitativen Inhaltsanalyse* [14,19] ausgewertet. Zusammenhängende individuelle Konzepte wurden einer individuellen Denkfigur zugeordnet. Ähnliche Vorstellungen verschiedener Lernender wurden als verallgemeinerte Vorstellung zusammengefasst [20].

4. Fragebogen-Ergebnisse

Im schriftlichen Teil nannten die Schüler/innen drei Verwendungsmöglichkeiten für die Linse:

- *Größenänderung*: „Verkrosern [sic] oder ferkleineren [sic]“, „vergrößern“, „fergrößern [sic]“, „verkroßer [sic] um besser zu sehen.“
- *Seh-Instrument*: „Um besser zu sehen“, „Augen“, „sehen“, „durch gucken [sic]“, „für Augen [,] das [sic] man besser sehen kann“, „zum durch kucken [sic].“
- *Kamera-Bestandteil*: „Kamera“, „zum aufnehmen [sic]. (Kamera)“, „Fotos machen“, „fotografieren.“

Bei der Frage, ob zwei räumlich versetzte Kerzen gleichzeitig scharf mit einer Sammellinse abgebildet werden können, wurden insgesamt alle zur Wahl stehenden Antworten angekreuzt: Drei Lernende vertraten die Aussage: „Es gibt eine Schirmposition, bei der beide Kerzen scharf abgebildet werden.“ Vier Lernende kreuzten an: „Es gibt zwei Schirmpositionen, bei denen beide Kerzen scharf abgebildet werden.“ Einer der Schüler erwartete dies, „weil zwei kerzen [sic] aufdem [sic] bild [sic] sind.“ Zwei Lernende nahmen an: „Es gibt unendlich viele Schirmpositionen, bei denen beide Kerzen scharf abgebildet werden.“ Drei Lernende wählten die richtige Antwort: „Es gibt keine Schirmposition, bei der beide Kerzen gleichzeitig scharf abgebildet werden.“ Einer der Schüler lieferte eine exemplarische Begründung: „Wen[n] man beim fotografieren [sic] scharf stellt auf die vordere Person [...], ist die hintere unscharf und so auch andersrum.“

Auch bei der Frage, was bei Abdeckung der oberen Linsenhälfte passiert, wurden insgesamt alle wählbaren Antworten angekreuzt: Zwei Lernende nahmen an: „Das Bild bleibt unverändert.“ Eine Begründungen hierfür lautete: „Weil er [der Karton] nur ein[en] teil [sic] verdeckt.“ Vier Lernende vermuteten: „Die untere Bildhälfte verschwindet.“ Begründungen lauteten: „Weil wen[n] man schaut [,] ist die Kerze falsch rum [,] also ist auch die Spitze dan[n] weg“ und „wenn bei der linse [sic] der obere teil [sic] ferdeckt [sic] ist [,] ist es bei dem schirm [sic] anderstrum [sic] (also der untere teil [sic]) [,] weil die kerze [sic] falsch herum ist.“ Zwei Lernende kreuzten an: „Die obere Bildhälfte verschwindet.“ Fünf Lernende wählten die richtige Antwort: „Das ganze Bild ist sichtbar, aber weniger gut ausgeleuchtet.“ Einer der Schüler erwartete dies deshalb, „weil [...] der Kartong [sic] dunkelmacht [sic].“

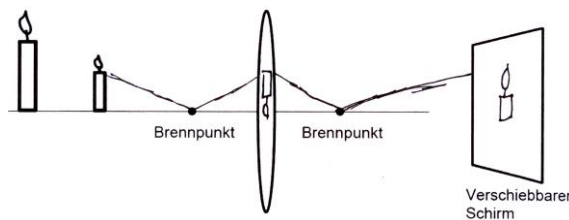


Abb. 1: Individuelle Vorstellung *Positionsabhängige Schärfe*. Ein Schüler nimmt an, dass Strahlen in den Brennpunkten gespiegelt werden und das Bild jeweils umgedreht wird. Er kreuzt an, dass bei *keiner* Schirmposition beide Gegenstände gleichzeitig scharf abgebildet werden.

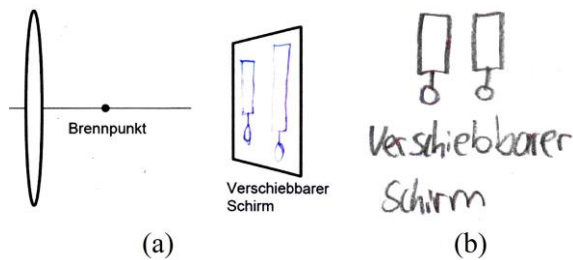


Abb. 2: Verallgemeinerte Vorstellung *Gleichzeitige Schärfe*. (a) *Gegenstandsweiten-unabhängige Schärfe*. Der Schüler zeichnet gegenstandsgemäße Bildgrößen ein und kreuzt an, dass es eine Schirmposition gibt, bei der beide Gegenstände scharf abgebildet werden. (b) *Schirmpositions-unabhängige Schärfe*. Der Schüler zeichnet perspektivgemäße Bildgrößen und kreuzt an, dass es unendlich viele Schirmpositionen gibt, bei denen beide Gegenstände scharf abgebildet werden.

In den Zeichnungen erkennen wir die Vorstellungen *Positionsabhängige Schärfe* (Abb. 1), *Gegenstandsweiten-unabhängige Schärfe* (Abb. 2(a)) und *Schirmpositions-unabhängige Schärfe* (Abb. 2(b)).

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

- *Lichtgebilde*: „Ein Strahl [,] wo [sic] aus Licht besteht“, „Einen [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 einem Teilversuch) beschreiben wir im **Futur**. Nachvollziehende Konzepte (nach einem Teilversuch), sowie Denkfiguren, beschreiben wir im **Präsens**. Je nachdem, wie die Schüler die Angemessenheit einschätzen, versehen wir die Konzepte mit Symbolen, vgl. [14]:

- Vertretene Vorstellung
- ? Zweifelbehaftete Vorstellung
- Δ ~~Abgelehnte Vorstellung~~
- ∇ Vertretene, aber später verworfene Vorstellung

Zwecks Anonymität wurden die Namen geändert.

5.1. Einzelstrukturierung Johann

Bei Johann findet man die Denkfiguren *Abstands-Abhängigkeit* (Tab. 1), *Bild-Zersetzung* (Tab. 2) und *Überstrahlung* (Tab. 3 und Abb. 3). Zum Betrachten des fertigen Linsenabbildes braucht man keine Lichtstrahlen.

Die Unschärfe ist abstandsabhängig.

- *Unterschiedliche Schärfe*: Wenn einer der Gegenstände scharf ist, ist der andere verschwommen.
- *Gegenstandsweiten-Abhängigkeit*: Die unterschiedliche Schärfe beruht auf unterschiedlichen Abständen zwischen Gegenstand und Linse.

Tab. 1: Johans Denkfigur *Abstands-Abhängigkeit*.

Versetzte Einzelbilder bilden ein zersetztes Bild.

- *Bild-erzeugende Löcher*: Mit der Löcherblende werden mehrere Einzelbilder erzeugt werden.
- ∇ *Bild-beschneidende Löcher*: Die Einzelbilder werden jeweils andere Abschnitte der Gegenstände zeigen.
- *Unterschiedlich helle Einzelbilder*: Die Einzelbilder sind unterschiedlich hell.
- *Unterschiedlich scharfe Einzelbilder*: Die Einzelbilder sind unterschiedlich scharf.
- *Unterschiedliche Bildkomposition*: In den Einzelbildern sind die Gegenstände unterschiedlich angeordnet.
- *Einzelbilder-Verschiebung*: Verschiebt man den Schirm, verschieben sich die Einzelbilder.
- *Unterschiedliche Bilderzahl*: An einer bestimmten Schirmposition sieht man den einen Gegenstand einmal und den anderen mehrfach.
- *Zersetztes Bild*: Wenn mit Löcherblende ein zersetztes Bild zu sehen ist, wird bei offener Linse ein unscharfes Bild entstehen.
- *Ausgedehnteres Gesamtbild*: Das unscharfe Gesamtbild nimmt mehr Raum ein als die beobachteten Einzelbilder.
- *Helleres Gesamtbild*: Das Gesamtbild ist heller als die Einzelbilder.

Tab. 2: Johans Denkfigur *Bild-Zersetzung*.

Überstrahlung macht das Bild unscharf.

- *Beleuchtende Strahlen*: Die Strahlen von der Lampe beleuchten die Gegenstände.
- *Bild-hinterlassende Strahlen*: Die Strahlen vom Gegenstand legen ein Bild auf den Schirm.
- *Spontane Sicht*: Das Bild ist auch ohne Licht zwischen Schirm und Auge sichtbar.
- *Strahlenversatzbedingte Unschärfe*: Versetzt auftreffende Strahlen ergeben ein unscharfes Bild.
- *Überstrahlungsbedingte Unschärfe*: Übermäßige Bestrahlung führt zu Unschärfe.

Tab. 3: Johans Denkfigur *Überstrahlung*.

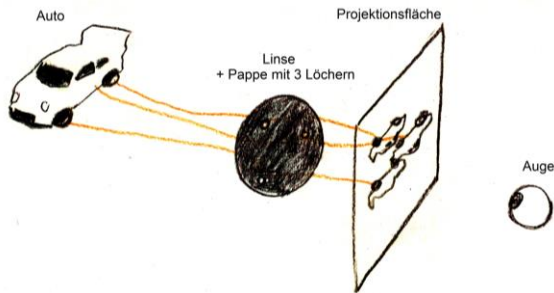


Abb. 3: Johann zeichnet Strahlen gemäß seinem Konzept *Bild-hinterlassende Strahlen* in die Vorlage. (Handschrift wurde hier nachträglich durch digitale Schrift ersetzt.)

5.2. Einzelstrukturierung Isaac

Isaac nutzt die Denkfiguren *Unpassender Strahlengang* (Tab. 4, Abb. 4) und *Bilder-Trennung* (Tab. 5). Damit bewegt er sich größtenteils in wissenschaftlichen Denkfiguren. Dementsprechend ist seine Strahlenzeichnung (Abb. 5) fachlich einwandfrei.

Unpassende Strahlen erzeugen Unschärfe.

- **Ausgebreitete Strahlen:** Unschärfe entsteht, da die Strahlen von einem Gegenstandspunkt sich ausbreiten und nicht auf einen Punkt gehen.
- **Zusätzliche Strahlen:** Entfernt man die Löcherblende, gehen zusätzlich Strahlen von anderen Gegenständen durch die Linse.
- **Verdrängte Strahlen:** Ein Gegenstand erscheint unscharf, wenn dessen Strahlen durch Strahlen anderer Gegenstände verdrängt werden.

Tab. 4: Isaacs Denkfigur *Unpassender Strahlengang*.



Abb. 4: Isaac zeigt mit auseinander gehenden Händen, wie Unschärfe entsteht, „wenn die Strahlen dann vorbei gehen.“

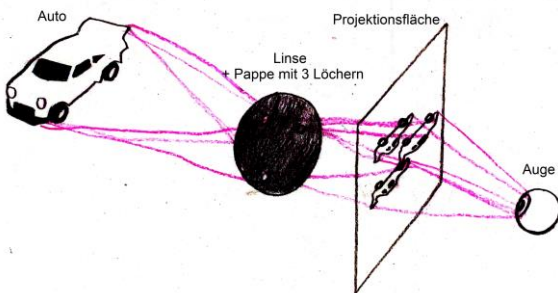


Abb. 5: Isaac zeichnet Strahlen gemäß seiner Denkfigur *Unpassender Strahlengang* in die Vorlage. (Handschrift wurde hier nachträglich durch digitale Schrift ersetzt.)

Getrennte Einzelbilder ergeben Unschärfe.

- **Bild-erzeugende Löcher:** Mit der Löcherblende werden mehrere Einzelbilder erzeugt werden.
- ▽ **Bild-begrenzende Löcher:** Die Einzelbilder werden jeweils andere Ausschnitte der Gegenstände zeigen.
- **Löchergemäße Anordnung:** Die Einzelbilder sind angeordnet wie die Löcher.
- **Betrachtungsrichtungs-Abhängigkeit:** Je nach Betrachtungsrichtung wirken die Einzelbilder auf dem Schirm anders.
- **Unterschiedlich helle Einzelbilder:** Die Einzelbilder sind unterschiedlich hell.
- **Unterschiedlich scharfe Einzelbilder:** Die Einzelbilder sind unterschiedlich scharf.
- **Getrennte Einzelbilder:** Bewegt man den Schirm zur Linse, trennen sich die Einzelbilder.
- **Veränderliche Bildgröße:** Bewegt man den Schirm zur Linse, werden die Einzelbilder kleiner.
- **Unterschiedliche Bildkomposition:** Die Einzelbilder unterscheiden sich in der Anordnung der Gegenstände.
- **Trennungsbedingte Unschärfe:** Die teilweise getrennten Einzelbilder wirken zusammen betrachtet unscharf.
- **Scheinbare Bewegung:** Wechselt man von den getrennten Einzelbildern zum Gesamtbild, scheint der Gegenstand zu rutschen und auseinander gezogen zu werden.

Tab. 5: Isaacs Denkfigur *Bilder-Trennung*.

Isaac möchte den Abbildungsvorgang anhand *mechanistischer Strahlen* erklären. Sie werden an Gegenständen gestreut und erzeugen nach Durchgang durch die Linse ein Bild auf dem Schirm. Zur Betrachtung des Bildes müssen Strahlen vom Schirm ins Auge gestreut werden.

5.3. Einzelstrukturierung Flavio

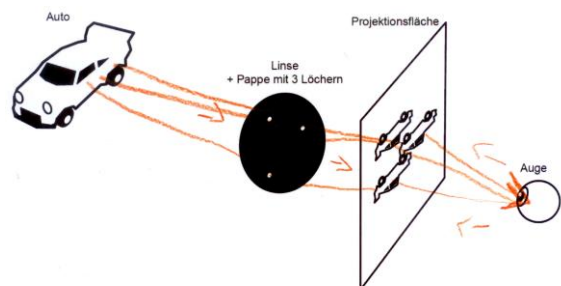


Abb. 6: Flavio zeichnet Strahlen gemäß seiner Denkfigur *Verstärkter Strahlengang* in die Vorlage.

Flavio nutzt die Denkfiguren *Scharfe Abbildung* (Tab. 6), *Licht-Überfluss* (Tab. 7), *Abstands-Einfluss* (Tab. 8), *Unterschiedliche Abbildungen* (Tab. 9) und *Verstärkter Strahlengang* (Tab. 10 und Abb. 6).

Optische Elemente erzeugen stets scharfe Bilder.

- ▽ **Gleichzeitige Schärfe:** Die Linse wird alle Gegenstände gleichzeitig scharf abbilden.
- ▽ **Scharf abbildende Löcherblende:** Die Löcherblende wird ein scharfes Bild erzeugen.

Tab. 6: Flavios Denkfigur *Scharfe Abbildung*.

Zu viel Licht macht das Bild unscharf.

- **Unschärfebedingende Lichtverhältnisse:** Unschärfe ist durch die Lichtverhältnisse bedingt.
- **Überschussbedingte Unschärfe:** Unschärfe entsteht, da zu viel Licht durch die Linse geht.

Tab. 7: Flavios Denkfigur *Licht-Überfluss*.

Abstände beeinflussen die Unschärfe.

- **Linsennahe Unschärfe:** Je näher der Schirm an der Linse ist, desto unschärfer ist das Bild.
- **Entfernungsabhängige Unschärfe:** Unterschiedlich entfernte Gegenstände kann man nicht gleichzeitig scharf abbilden.
- **Ausgezeichneter Bildort:** Das Bild eines Gegenstands ist nur an einem Schirm-Ort scharf.

Tab. 8: Flavios Denkfigur *Abstands-Einfluss*.

Löcher an der Linse ergeben verschiedene Bilder.

- **Mehrfache Einzelbilder:** Mit Löchern sieht man nah an der Linse alles mehrfach.
- **Unschärfe Einzelbilder:** Weiter weg von der Linse wirken die Einzelbilder etwas unschärfer.
- **Einzelbilder-Verschiebung:** Verschiebt man den Schirm, verschieben sich die Einzelbilder.
- **Betrachterabhängige Bilderzahl:** Die Zahl der Einzelbilder schwankt mit der Kopfposition.
- **Unterschiedliche Bildkomposition:** Die Einzelbilder zeigen verschiedene Objektanordnungen.
- **Kopfstehende Einzelbilder:** Die Einzelbilder sind verkehrt herum.
- **Aufrechte Loch-Aussicht:** Vom Loch aus sieht man das Motiv aufrecht.
- **Löchergemäße Bilder-Anordnung:** Die Einzelbilder sind so angeordnet wie die Löcher.

Tab. 9: Flavios Denkfigur *Unterschiedliche Abbildungen*.

Sehstrahlen verstärken die augwärtigen Strahlen.

- **Beleuchtende Strahlen:** Strahlen gehen von der Lichtquelle auf den Gegenstand.
- **Bilderzeugende Strahlen:** Vom beleuchteten Gegenstand abprallende Strahlen gehen durch die Löcher und erzeugen so die Einzelbilder.
- **Augwärtige Strahlen:** Strahlen gehen vom Bild ins Auge.
- **Verstärkende Strahlen:** Vom Auge kommen Strahlen, die das Bild besser sichtbar machen.

Tab. 10: Flavios Denkfigur *Verstärkter Strahlengang*.

5.4. Einzelstrukturierung Adam

Bei Adam erkennen wir die Denkfiguren *Geometriebedingte Unschärfe* (Tab. 11), *Bilder-Überlagerung* (Tab. 12) und *Zweiseitiger Strahlengang* (Tab. 13 und Abb. 7). Dass Strahlen vom Auge ausgehen, begründet er so:

Adam: Weil, wenn's nur -- von da (zeigt aufs Auto) kommen tät', dann tät' man ja nichts sehen, also muss ja auch was vom Auge kommen. [...]

Interviewer: Also, wenn nichts vom Auge kommen würde, würden wir nicht sehen, meinst du. [...]

Adam: Schon was sehen, aber halt nicht so, wie wir jetzt sehen.

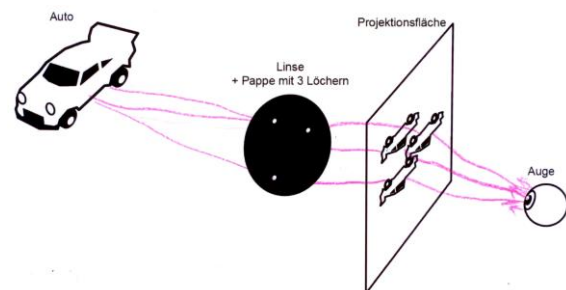


Abb. 7: Adam zeichnet Strahlen gemäß seiner Denkfigur *Zweiseitiger Strahlengang* in die Vorlage.

Die Aufbaugeometrie bedingt die Unschärfe.

- ▽ **Gleichzeitige Schärfe:** Man wird alle Gegenstände gleichzeitig scharf abbilden können.
- **Nähebedingte Unschärfe:** Unschärfe entsteht, wenn der Gegenstand zu nah an der Linse ist.
- **Entfernungs-Entsprechungen:** Je weiter der Gegenstand von der Linse entfernt ist, desto näher ist das scharfe Bild an der Linse.
- **Linsengrößenbedingte Unschärfe:** Unschärfe entsteht, weil die Linsenöffnung zu groß ist.

Tab. 11: Adams Denkfigur *Geometriebedingte Unschärfe*.

Unterschiedliche Bilder überlagern sich.

- **Löcherbedingte Verschlechterung:** Mit Löchern vor der Linse wird man etwas Unscharfes und Dunkles sehen.
- **Unschärfe Einzelbilder:** Nah an der Linse sind die Einzelbilder leicht unscharf.
- **Unterschiedliche Bilderzahl:** Sieht man den einen Gegenstand einfach, sieht man den anderen mehrfach.
- **Löchergemäße Bilder-Anordnung:** Die Einzelbilder sind wie die Löcher angeordnet.
- **Kopfstehende Einzelbilder:** Die Einzelbilder sind verkehrt herum.
- **Unterschiedliche Bildkomposition:** Die Einzelbilder unterscheiden sich in der Anordnung der Gegenstände.
- **Schirmloses Bild:** Ohne Schirm und Löcher sieht man durch die Linse das gleiche Motiv.
- **Unterschiedliche Blickrichtungen:** Unterschiedliche Einzelbilder entsprechen unterschiedlichen Blickrichtungen.
- **Schärfegemäßer Blickpunkt:** Der Blickpunkt ist der Betrachter-Ort für eine scharfe Ansicht.
- **Projektionsgemäße Aussicht:** Die Loch-Aussicht entspricht dem projizierten Einzelbild.
- **Bilderversatzbedingte Unschärfe:** Versetzte Einzelbilder ergeben ein unscharfes Bild.

Tab. 12: Adams Denkfigur *Bilder-Überlagerung*.

Strahlen kommen vom und zum Auge.

- **Objekt-erfassende Strahlen:** Strahlen gehen vom Auge zu den Bildern und von dort durch die Löcher zum Gegenstand.
- **Bild-vermittelnde Strahlen:** Strahlen gehen vom Gegenstand durch die Löcher zu den Bildern und von dort zum Auge.

Tab. 13: Adams Denkfigur *Zweiseitiger Strahlengang*.

5.5. Einzelstrukturierung Oliver



Abb. 8: Oliver schaut durch ein kleines Loch zwischen seinen Fingern, um vorherzusagen, was mit einer Löcherblende an der Linse auf den Schirm projiziert wird. Hierbei bildet er das Konzept *Eingeschränkte Lochaussicht*.

Bei Oliver finden wir die Denkfiguren *Kamera-Analogismus* (Tab. 14), *Auge-Analogismus* (Tab. 15 und Abb. 8), *Bilder-Überlagerung* (Tab. 16), *Spektron-Analogismus* (Tab. 17) und *Beidseitiger Strahlengang* (Tab. 18).

Linse und Schirm ähneln einer Kamera.

- ▽ **Gleichzeitige Schärfe:** Man wird alle Gegenstände gleichzeitig scharf abbilden können.
- **Teilweise Schärfe:** Man kann jeweils nur einen Gegenstand scharf stellen.
- **Kamera-Zoom:** Die Linse und der Schirm sind wie eine Kamera, mit der man ranzoomen kann.
- **Nähebedingte Unschärfe:** Geht man zu nah an den Gegenstand, kann man ihn nicht gut sehen.

Tab. 14: Olivers Denkfigur *Kamera-Analogismus*.

Linse und Schirm ähneln dem Auge.

- **Augen-Analogie:** Linse und Schirm sind wie ein Auge, nur, dass der Schirm verschiebbar ist.
- **Umgekehrtes Bild:** Das Bild ist umgekehrt.
- ▽ **Eingeschränkte Lochaussicht:** Durch ein kleines Loch wird man nur Nahes scharf sehen.

Tab. 15: Olivers Denkfigur *Auge-Analogismus*.

Unterschiedliche Bilder überlagern sich.

- **Löchergemäße Bilderzahl:** Mit drei Löchern kann man drei Autos und drei Schachteln sehen.
- **Unterschiedliche Bildkomposition:** Die Einzelbilder zeigen unterschiedlichen Versatz zwischen den Gegenständen.
- ▽ **Lochgrößenbedingte Bildkomposition:** Die Bildkomposition hängt von der Lochgröße ab.
- **Lochpositionsbedingte Bildkomposition:** Die Bildkomposition hängt vom Ort des Lochs ab.
- **Löchergemäße Bilderanordnung:** Die Einzelbilder sind wie die Löcher angeordnet.
- **Blickpunkt am Loch:** Um das gleiche Motiv ohne Schirm sehen zu können, wird man vom Ort des Lochs aus schauen müssen.
- ▽ **Löchergemäße Linsenabbildung:** Nimmt man die Löcherblende von der Linse weg, wird man dieselben Einzelbilder sehen.
- **Abstandsabhängige Unschärfe:** Sieht man den einen Gegenstand nur einmal, wird man den anderen verschwommen sehen.
- **Bilderzahlbedingte Unschärfe:** Erscheint ein Gegenstand mit Löcherblende an der Linse mehrfach, wird er ohne Blende unscharf wirken.

Tab. 16: Olivers Denkfigur *Bilder-Überlagerung*.

Die Unschärfe entsteht wie beim Spektrum.

- **Spektrren-Analogie:** Das unscharfe Bild ist so ähnlich wie ein Spektrum.
- **Mischungsbedingte Unschärfe:** Das Bild ist unscharf, weil die Linse die Farben vermischt.

Tab. 17: Olivers Denkfigur *Spektrren-Analogismus*.

Strahlen kommen vom und zum Gegenstand.

- **Objekt-erfassende Strahlen:** Strahlen gehen vom Auge zu den Einzelbildern und durch die Löcher geradeaus zum Auto.
- **Bild-erzeugende Strahlen:** Strahlen gehen von den Löchern zum Schirm und erzeugen Einzelbilder vom Gegenstand.

Tab. 18: Olivers Denkfigur *Beidseitiger Strahlengang*.

Nachdem er *Objekt-erfassende Strahlen* in die Vorlage eingezeichnet hat (Abb. 9), erläutert er sein Konzept *Bild-erzeugende Strahlen* (Tab. 18).

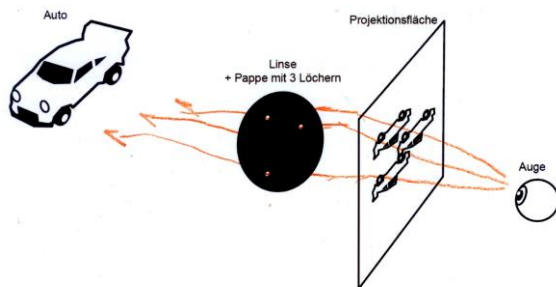


Abb. 9: Oliver zeichnet Strahlen gemäß seinem Konzept *Objekt-erfassende Strahlen* in die Vorlage.

5.6. Einzelstrukturierung René

Die Linse verhält sich wie das Auge.

- **Unterschiedliche Schärfe:** Man wird nicht alle Gegenstände scharf abbilden können.
- **Wahrnehmende Linse:** Unschärfe wird entstehen, da die Linse manches falsch wahrnimmt.
- **Nähebedingte Unschärfe:** Zu nah befindliche Gegenstände werden unscharf erscheinen.
- **Augenartige Anpassung:** Die Linse muss sich wie ein Auge auf den Gegenstand einstellen.
- **Überforderte Linse:** Ist der Gegenstand zu nah, ist die Linse überfordert.
- **Konzentrierte Linse:** Die Linse konzentriert sich auf einen Gegenstand.
- **Umgekehrtes Bild:** Das Bild ist verkehrt herum.
- **Verdunkelndes Loch:** Eine Löcherblende an der Linse wird das Bild verdunkeln, ähnlich wie beim Blick durch ein kleines Loch.

Tab. 19: René's Denkfigur *Auge-Analogismus*.

Renés Äußerungen deuten auf die Denkfiguren *Auge-Analogismus* (Tab. 19), *Geometrie-Abhängigkeit* (Tab. 20), *Mehrfache Darstellung* (Tab. 21) und *Ansichten-Vermittlung* (Tab. 22 und Abb. 10). Während er die Unschärfe anhand der Einzelbilder erklären soll, möchte er verstehen, wie diese entstehen.

Die Unschärfe liegt an der Aufbaugeometrie.

- **Entfernungsabhängige Unschärfe:** Die unterschiedliche Schärfe entsteht durch unterschiedliche Distanz der Gegenstände.
- **Schirmortsabhängige Schärfe:** Man kann auf beliebige Gegenstände scharf stellen, indem man den Schirm verschiebt.
- ▽ **Aufgeteilte Scharfstellung:** Mit der Löcherblende werden die Gegenstände gleich scharf erscheinen, weil jedes Loch für eine andere Distanz zuständig sein wird.
- ▽ **Höhengemäße Teil-Abbildung:** Das obere Loch wird den oberen Gegenstand abbilden, das untere Loch den unteren.
- **Höhengemäße Voll-Abbildung:** Jedes Loch bildet alle Gegenstände scharf ab, aber auf unterschiedlicher Höhe.

Tab. 20: René's Denkfigur *Geometrie-Abhängigkeit*.

Unschärfe kommt durch mehrfache Darstellung.

- **Unterschiedliche Bilderzahl:** Je nach Schirmposition sieht man mit Löchern den Gegenstand einfach oder mehrfach.
- ▽ **Unterschiedlich große Einzelbilder:** Die Einzelbilder sind unterschiedlich groß.
- **Unterschiedlich helle Einzelbilder:** Die Einzelbilder sind unterschiedlich hell.
- **Unterschiedliche Bildkomposition:** Die Einzelbilder unterscheiden sich in den Abständen zwischen den dargestellten Gegenständen.
- **Unterschiedliche Blickrichtungen:** Jedes Einzelbild entspricht einer anderen Blickrichtung.
- **Linsennahe Blickpunkte:** Der jeweilige Blickpunkt liegt bei der Linse.
- **Bilderzahlbedingte Unschärfe:** Erscheint ein Gegenstand mit Löcherblende an der Linse mehrfach, wird er ohne Blende unscharf wirken.
- **Versatzbedingte Unschärfe:** Die versetzten Einzelbilder wirken insgesamt verschwommen.
- **Unschärfebedingte Unsichtbarkeit:** Wenn ein Gegenstand sehr unscharf dargestellt wird, sieht man ihn nicht.

Tab. 21: René's Denkfigur *Mehrfache Darstellung*.

Strahlen vermitteln mehrere Ansichten.	
▽	Sprunghafter Strahlengang: Strahlen gehen vom Auge durch die Löcher zum Gegenstand und dann zu den Einzelbildern.
•	Durchgängige Sehstrahlen: Strahlen gehen vom Auge durch den Schirm zu den Löchern und dann zum Gegenstand.

Tab. 22: René's Denkfigur *Ansichten-Vermittlung*.

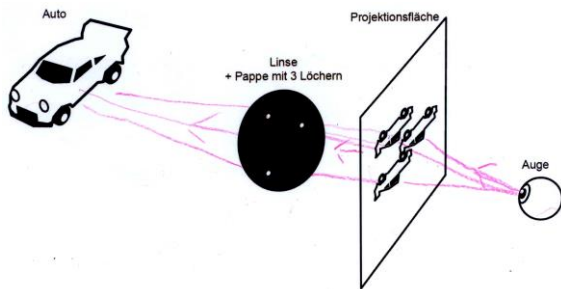


Abb. 10: René zeichnet Strahlen gemäß seinem Konzept *Durchgängige Sehstrahlen*.

6. Verallgemeinerte Vorstellungen

Im Folgenden verallgemeinern wir die Ergebnisse der Fragebögen und Interviews gemäß wesentlichen thematischen Gesichtspunkten.

6.1. Verallgemeinerte Begriffe

Zum Wort „Strahl“

- Lichtgebilde:** Ein Strahl ist ein Gebilde aus Licht (vgl. ‚Wasser-Strahl.‘ Hingegen Englisch: ‚Water jet,‘ Französisch: ‚jet d’eau‘).
- Lichtbestandteil:** Ein Strahl ist ein Bestandteil des Lichts (ähnlich wie Newtons Begriff).

6.2. Verallgemeinerte Konzepte

Zu Bedingungen der Unschärfe

- Gegenstandsweiten-bedingte Unschärfe:** Ein projiziertes Linsenabbild ist unscharf, es sei denn, der Gegenstand ist an der richtigen Stelle.
- Schirmpositions-bedingte Unschärfe:** Ein projiziertes Linsenabbild ist immer unscharf, es sei denn, der Schirm steht an der passenden Stelle.
- Linsengrößenbedingte Unschärfe:** Je größer die Linse, desto unschärfer kann das Bild sein.
- Mischungsbedingte Unschärfe:** Die Linse vermischt das Licht vom Gegenstand.
- Bildversatzbedingte Unschärfe:** Versetzte Einzelbilder von verschiedenen Punkten der Linse ergeben ein unscharfes Gesamtbild.
- Überflussbedingte Unschärfe:** Zu viel Licht macht das Bild unscharf.
- Strahlenversatzbedingte Unschärfe:** Ein Bild ist immer unscharf, es sei denn, die Strahlen von einem Gegenstandspunkt laufen wieder in einem Punkt zusammen.

Zu den löcherbedingten Einzelbildern

- Unterschiedlich helle Einzelbilder:** Die Einzelbilder sind unterschiedlich hell.
- Unterschiedlich scharfe Einzelbilder:** Die Einzelbilder sind unterschiedlich scharf.
- Unterschiedlich komponierte Einzelbilder:** Die Einzelbilder unterscheiden sich in der scheinbaren Anordnung der Gegenstände.
- Blickrichtungsgemäße Einzelbilder:** Die Einzelbilder entsprechen verschiedenen Blickrichtungen.
- Blickpunktgemäße Einzelbilder:** Die Einzelbilder entsprechen der Aussicht vom jeweiligen Punkt an der Linse aus.

Zum Betrachten des Schirms

- Extramission:** Licht kommt aus dem Auge.
- Intromission:** Licht geht in das Auge.
- Spontane Sicht:** Das Bild ist auch ohne Licht zwischen Auge und Schirm sichtbar.

6.3. Verallgemeinerte Denkfiguren

Zur Abbildung mit einer Konvexlinse

- Holistischer Auge-Analogismus:** Die Linsenabbildung funktioniert ähnlich wie das Sehen eines Gegenstandes.
- Holistischer Kamera-Analogismus:** Die Linsenabbildung funktioniert ähnlich wie das Fotografieren oder Filmen eines Gegenstands.
- Holistische Bilder-Überlagerung:** Die Linsenabbildung beruht auf einer Überlagerung von Einzelbildern des Gegenstands.
- Licht-Ablenkung:** Die Linsenabbildung beruht auf einer Ablenkung von Licht zwischen Gegenstand und Schirm.

7. Diskussion

Anhand von schriftlichen und mündlichen Befragungen haben wir Präkonzepte zur Linsenabbildung bei Schüler/innen zweier siebter Klassen erhoben. Hierbei haben wir bereits bekannte Schülervorstellungen [1-13] wiedererkannt. Darüber hinaus haben wir Präkonzepte zur Unschärfe herausgearbeitet und deren Wandel bei einem bildbasierten Zugang zur Linsenabbildung [16] nachvollzogen.

In den Vermittlungsexperimenten haben wir wertvolle Erfahrungen für den Optikunterricht gemacht. Erstens idealisierten die Schüler die Einzelbilder noch nicht als gleich scharfe, gleich helle Bilder - sie wussten noch nicht, dass die Helligkeit des transluzenten Schirms von der Blickrichtung abhängt und verglichen vielmehr die Einzelbilder miteinander als mit dem Gesamtbild. Zweitens erkannten sie zwar gefühlsmäßig den Zusammenhang zwischen den Einzelbildern und dem Gesamtbild, suchten aber darüber hinaus nach Erklärungen im Sinne eines mechanistischen Strahlenbegriffs. Drittens bildeten die Schüler mehrere Denkfiguren aus, aber verbanden sie noch kaum. Allerdings ist es bemerkenswert, dass sie sich für die Vermittlung von

kenswert, wie beweglich die Schüler im Denken waren, und zwar innerhalb der kurzen Interviewzeit.

Ähnlich wie in anderen Erhebungen [5,7] zeichneten viele unserer Schüler den Strahlenverlauf nahezu parallel zur optischen Achse ein. Außer bei Isaac (Abb. 5) wird noch kein klarer Bezug zwischen Bild- und Gegenstandspunkten hergestellt, die Strahlen deuten vielmehr eine holistische Beziehung zwischen Bild und Gegenstand an, vgl. [2,5,11].

An den Ergebnissen ist erkennbar, dass Vorstellungen zur Linsenabbildung eng mit Vorstellungen zum Sehen verbunden sind. Deshalb tragen wir in Tab. 23 und Tab. 24 physikbezogene Schülervorstellungen zum Sehen nach Gropengießer [14] zusammen. Seine Kategorie der *Extrospektion* innerhalb der Denkfigur *Evidenz* (Tab. 23) schließt das von uns erhobene Konzept *Extramission* ein, vgl. [21]. Innerhalb der Denkfigur *Instruktion* (Tab. 24) finden wir Konzepte wieder, die sich unseren holistischen Denkfiguren (Abschnitt 6.3) zuordnen lassen.

Wenn man auf etwas schaut, sieht man es.

- a) **Extrospektion:** Der Blick geht zum Gegenstand.
- b) **Lichtbedarf:** Man braucht zum Sehen Licht.

Tab. 23: Verallgemeinerte Denkfigur *Evidenz*, in Anlehnung an [14].

Beim Sehen unterrichtet das Objekt das Subjekt.

- a) **Holistische Strahlen:** Strahlen vom ganzen Gegenstand treffen auf das Auge.
- b) **Instruktive Eidola:** Bilder vom Gegenstand gehen ins Auge.
- c) **Holistisches Bild:** Die Augenlinse erzeugt aus Strahlen vom Gegenstand ein ganzes Bild auf der Netzhaut.

Tab. 24: Verallgemeinerte Denkfigur *Instruktion*, in Anlehnung an [14].

Darüber hinaus haben wir bei Johann (vgl. Abb. 3 und Tab. 3) das Konzept *Spontaneous Vision* [2] wiedergefunden und es hier als *Spontane Sicht* bezeichnet. Angesichts der Denkfigur *Augen-Analogismus* (Abschnitt 6.3) ist die typische Fehlvorstellung zu beachten, dass nur die Augenlinse für die Lichtbrechung Sorge [22].

Ein Großteil der Erhebung von Vorstellungen beruht auf Deutungen der Lernenden-Aussagen. Daher sind die Ergebnisse nicht objektiv. Sie sind verfahrensgemäß subjektiv und können höchstens intersubjektiv überprüft werden. Um jedoch die Güte der Ergebnisse zu sichern, haben wir Maßnahmen ergriffen, die die *Auswahlgültigkeit*, *korrelative Gültigkeit* und die *Verfahrensgültigkeit* gewährleisten, vgl. [14]. Im Sinne der *Auswahlgültigkeit* haben wir gewöhnliche Schüler/innen der betreffenden Jahrgangsstufe befragt. Im Sinne der *korrelativen Gültigkeit* haben wir die Ergebnisse im Abgleich mit bekannten Schülervorstellungen und mit histori-

schen sowie aktuellen Vorstellungen von Wissenschaftlern erarbeitet. Im Sinne der *Verfahrensgültigkeit* haben wir bei den Interviews eine wertschätzende Situation geschaffen, verschiedene Fragezugänge sowie verschiedene Darstellungsebenen genutzt, die Qualitative Inhaltsanalyse in ihrer didaktischen Version Schritt für Schritt abgearbeitet, die Schritte dokumentiert und unsere Deutungen der Lernenden-Äußerungen auf Begründungen gestützt.

Trotzdem haben wir nur eine von vielen möglichen Darstellungen der Konzepte und Denkfiguren erarbeitet. Dies liegt zum einen an der Zielabhängigkeit und zum anderen an der Offenheit des Auswertungsverfahrens. Wir haben die Vorstellungen vor allem in Hinblick auf einen bildbasierten Zugang ausgewertet. Bei der Verallgemeinerung der Vorstellungen besteht eine große Unsicherheit, weil dieser Schritt in bisherigen Arbeiten zur Didaktischen Rekonstruktion weder konstruktivistisch gerechtfertigt noch methodologisch erläutert wurde.

8. Ausblick

Die Liste verallgemeinerter Vorstellungen zur unscharfen Linsenabbildung ist für drei Zwecke vorgesehen: Erstens kann sie bei weiteren qualitativen oder quantitativen Untersuchungen von Schülervorstellungen als Orientierung genutzt werden. Zweitens kann sie zum wechselseitigen Vergleich mit fachlichen Vorstellungen herangezogen werden. Drittens kann sie dazu dienen, schülergerechten Optikunterricht zu gestalten.

9. Danksagung

Die Lehrerin Eva Drescher hat die Fragebögen ausfüllen lassen und zusammen mit dem Klassenlehrer Karsten Maluck Zeit und Raum für die Schülerinterviews zur Verfügung gestellt. Dafür bedanke ich mich sehr herzlich. Zudem danke ich den Schüler/innen der Gesamtschule Bergatreute, die an den Befragungen teilgenommen haben. Bei Prof. Dr. Florian Theilmann bedanke ich mich für Diskussionen und seine Durchsicht des Manuskripts. Prof. Dr. Harald Gropengießer danke ich für die Antworten auf meine Fragen zur Verallgemeinerung. Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner danke ich für die Zusendung seines Artikels [21]. Ich bedanke mich bei Dipl.-Ing. Helmuth Grötzebauch für die Begutachtung. Für das Korrekturlesen danke ich Henriette Bast.

10. Literatur

- [1] 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
- [2] Galili, Igal; Hazan, Amnon (2000): The influence of an historically oriented course on students' content knowledge in optics evaluated by means of facets-schemes analysis. In: Phys. Educ. Res., Am. J. Phys. Suppl. 68, 7, S. 3-15

- [3] Galili, Igal (1996): Students' conceptual change in geometrical optics. In: *Int. J. Sci. Educ.* 18, 7, S. 847-868
- [4] Tao, Ping-Kee (2000): Computer supported collaborative physics learning: developing understanding of image formation by lenses. In: *Research Colloquium 2000: ICT supported teaching and learning*, Hong Kong, China, 8-9 June 2000, S. 1-24
- [5] Hubber, Peter (2005): Explorations of Year 10 students' conceptual change during instruction. In: *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching* 6, 1, S. 1-27
- [6] Wiesner, Hartmut (1995): Physikunterricht - an Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten orientiert. In: *Unterrichtswissenschaft* 23, 2, S. 127-145
- [7] Goldberg, Fred M.; McDermott, Lillian C. (1987): An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. In: *Am. J. Phys.* 55, 2, S. 108-119
- [8] Glantschnig, Sebastian (2013): Testitem-Entwicklung zu Schülervorstellungen zu Brechung und Linsen. Diplomarbeit, Universität Wien
- [9] Fetherstonhaugh, Anthony; Happs, John; Treagust, David (1987): Student misconceptions about light: a comparative study of prevalent views found in Western Australia, France, New Zealand, Sweden and the United States. In: *Res. Sci. Educ.* 17, S. 156-164
- [10] Galili, Igal; Hazan, Amnon (2000): Learners' knowledge in optics: interpretation, structure and analysis. In: *Int. J. Sci. Educ.* 22, 1, S. 57-88
- [11] Galili, Igal; Bendall, Sharon; Goldberg, Fred (1993): The effects of prior knowledge and instruction on understanding image formation. In: *J. Res. Sci. Teach.* 30, 3, S. 271-301
- [12] Pompea, Stephen M.; Dokter, Erin F.; Walker, Constance E.; Sparks, Robert T. (2007): Using misconceptions research in the design of optics instructional materials and teacher professional development programs. In: *Tenth International Topical Meeting on Education and Training in Optics and Photonics*. International Society for Optics and Photonics, 2015, S. 966515.1-1966515.8
- [13] Aydin, Suleyman; Ural Keles, Pinar; Hasiloglu, M. Akif (2012): Establishment for misconceptions that science teacher candidates have about geometric optics. In: *The online journal of new horizons in education* 2, 3, S. 7-15
- [14] 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
- [15] 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
- [16] Grusche, Sascha (2016): Seeing lens imaging as a superposition of multiple views. In: *Phys. Educ.* 51, 1, 015006
- [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)
- [21] Wiesner, Hartmut (1986): Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten im Bereich der Optik. In: *NiU-P/C* 34, 13, S. 25-29
- [22] Kaltakci, Derya; Eryilmaz, Ali (2009): Sources of optics misconceptions. In: Cakmakci, G.; Tasar, M. F. (Hrsg.): *Contemporary science education research: learning and assessment*, S. 13-16