

Qualitative Schulbuchanalyse zum Thema Linsenabbildung

Sascha Grusche*

*Didaktik der Physik, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden
sascha.grusche@tu-dresden.de

Kurzfassung

Schulbücher bilden eine Brücke zwischen Lehrplan und Unterricht. An ihnen lassen sich lehrplan-konforme und unterrichtstypische Zugänge zu einem gegebenen Thema ablesen. Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, schulbuchgemäße Zugänge zur Linsenabbildung herauszuarbeiten. Es wird qualitativ analysiert, wie das Phänomen des Linsenbildes und das Modell des Strahls zueinander in Bezug gesetzt werden. Dementsprechend werden die Schritte der phänomenologischen Methode und der verallgemeinerten Modellmethode als Analyseraster auf die Strukturelemente der Schulbücher gelegt. Bei der Kategorisierung der nahegelegten Lernhandlungen und bei der diagrammatischen Darstellung der vorgesehenen Lernwege werden einige Schwachpunkte deutlich. Der schulbuchgemäße Zugang zur Linsenabbildung sollte dementsprechend umstrukturiert, ergänzt oder ersetzt werden.

1. Einleitung

Kinder erleben Linsenabbildung täglich—beim Sehen, Fotografieren und Filmen. Deshalb entwickeln sie Vorstellungen zur Linsenabbildung, noch ehe sie dazu unterrichtet werden.

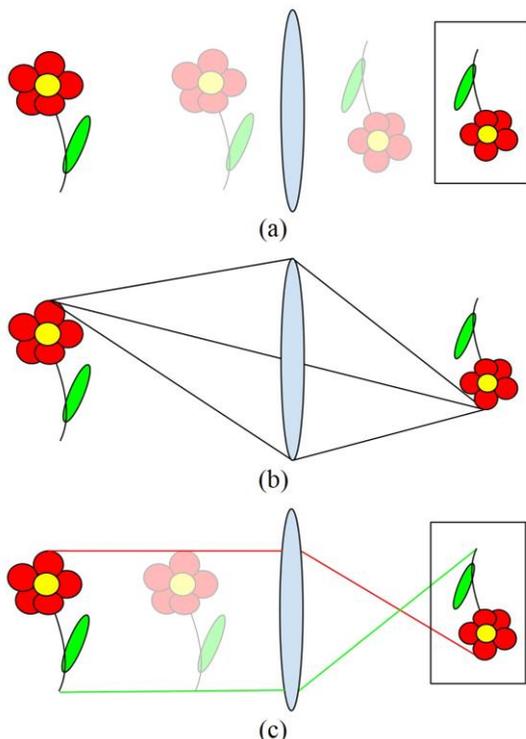


Abb. 1: Vorstellungen zur Linsenabbildung. (a) Holistische, (b) analytische, (c) hybride Denkfigur.

Vor dem Optikunterricht nutzen viele Lernende eine bildbezogene, *holistische Denkfigur* (Abb. 1(a)): Sie stellen sich vor, dass vom Gegenstand her ein vollständiges Bild kommt und durch die Linse bis zum Auffangschirm geht [1-4].

Im Optikunterricht vermittelt die Lehrperson eine strahlenbezogene, *analytische Denkfigur* [1-4] (Abb. 1(b)). Demnach divergieren von jedem einzelnen Gegenstandspunkt unzählige Strahlen, die auf Grund der Linse in einem entsprechenden Bildpunkt konvergieren [5].

Nach dem Unterricht nutzen viele Lernende eine Mischung aus ihrer holistischen und der analytischen Denkfigur (Abb. 1(c)): Sie stellen sich vor, dass das Bild als Ganzes vom Gegenstand durch die Linse zum Schirm geht, und dass dabei jeder Bildpunkt von je einem Strahl getragen wird [1-4].

Aus fachlicher Sicht ist diese *hybride Denkfigur* [1-4] in doppelter Hinsicht falsch:

- Es kommt zu einem Fehlbezug zwischen Bildpunkten und Strahlen.
- Der geometrische Strahl wird als körperhafter Lichtbestandteil fehlgedeutet.

Aus Sicht der Lernenden ist die hybride Denkfigur nutzlos und verwirrend: Eine korrekte Vorhersage von Bildeigenschaften ist nicht möglich und der Bezug zum Wellen- und Teilchencharakter des Lichts bleibt unklar.

Aus didaktischer Sicht entsteht die hybride Denkfigur im Wechselspiel zwischen vorunterrichtlichen Vorstellungen und unterrichtlichen Lernhandlungen. Somit trägt der herkömmliche Optikunterricht zu den Lernschwierigkeiten und Fehlvorstellungen bei.

Deshalb wollen wir herausfinden, wie herkömmlicher Unterricht zur Linsenabbildung abläuft. Hierfür analysieren wir Schulbücher, denn Lehrpersonen gestalten die Unterrichtsstruktur oft in Anlehnung an die Schulbuchstruktur (Abschnitt 2).

Bei unserer Analyse von gymnasialen Schulbüchern [6-11] zum Thema Linsenabbildung (Abschnitt 3) lautet die **Hauptfrage:**

Wie werden das *Phänomen des Bildes* und das *Modell des Strahls* aufeinander bezogen?

Dementsprechend lauten unsere **Teilfragen**:

1. Welche Arten von phänomenbasierten oder modellorientierten Lernhandlungen werden in den Schulbüchern nahegelegt?
2. Welche Abfolge von Lernhandlungen wird durch die Struktur der Schulbücher nahegelegt?

Auf Grundlage der Analyseergebnisse (Abschnitt 4) werden wir diskutieren, wie schulbuchgemäßer Optikunterricht zu Lernschwierigkeiten und Fehlvorstellungen beiträgt (Abschnitt 5). Sobald wir die lernhinderlichen Unterrichtselemente erkannt haben, können wir sie durch lernförderliche ersetzen (Abschnitt 6).

2. Strukturelemente eines Schulbuches

„Die einzelnen Buchabschnitte haben eine Gliederung ähnlich wie eine Schulstunde: Motivation und Problemstellung am Anfang, Versuch und Versuchsauswertung im Mittelpunkt, daraus hergeleitet das Ergebnis (die Problemlösung), schließlich Anwendung und Übung.“ ([12], S. 28).

Die Struktur eines Schulbuchs besteht aus folgenden Elementen: Leiteinrichtungen, Text, Abbildungen, Experimentierangaben, Tabellen, Merkstoff und Aufgaben [12].

Leiteinrichtungen umfassen das Inhaltsverzeichnis, das Register und Überschriften ([12], S. 24). Das Inhaltsverzeichnis dient dem Überblick über die Gesamtstruktur ([12], S. 24).

Text dient dazu,

„den gesamten Unterrichtsstoff umfassend darzustellen. Dazu gehören Beobachtungen, Phänomene, Gesetze, Theorien der Physik und ihrer Nachbardisziplinen. Der gedankliche Weg zu den Gesetzen wie auch Folgerungen und Anwendungen, die sich aus ihnen ergeben, sollen deutlich werden.“ ([12], S. 17)

Abbildungen umfassen Fotografien und bildhafte Zeichnungen, schematische Zeichnungen sowie Diagramme ([12], S. 18).

- Fotos und bildhafte Zeichnungen verweisen meist auf Alltags-Situationen oder experimentelle Unterrichtsphasen ([12], S. 20).
- Schematische Zeichnungen stellen oft Schulerperimente oder Modellvorstellungen dar ([12], S. 21). Sie „leisten [...] einen Beitrag im Lernprozeß zu fachspezifischer Kodierung und Abstraktion“ ([12], S. 20), also auch zur Modellierung.
- Diagramme stellen mathematische Funktionen dar ([12], S. 21).

Experimentierangaben umfassen Anleitungen zu Schülerversuchen und Schilderungen von Demonstrationsversuchen ([12], S. 22).

Tabellen dienen der Fakten-Auflistung ([12], S. 21-22).

Merkstoff ist im Text meist hervorgehoben und dient der Formulierung von Gesetzen, der Erklärung von Begriffen oder der Zusammenfassung ([12], S. 22).

Aufgaben zur Ergebnissicherung befinden sich meist am Ende eines Abschnitts oder Kapitels ([12], S. 23).

3. Vorgehen bei der Schulbuchanalyse

Als Analysematerial wurden gymnasiale Schulbücher verwendet, die laut Bildungsstandards aktuell in Baden-Württemberg zugelassen sind:

- *Dorn-Bader Physik* [6]
- *Duden Physik* [7]
- *Fokus Physik* [8]
- *Impulse Physik* [9]
- *Spektrum Physik* [10]
- *Universum Physik* [11]

Bei der Qualitativen Inhaltsanalyse [15] der Schulbücher wurden die Schritte der Zusammenfassung, Explikation und Strukturierung umgesetzt.

3.1. Zusammenfassung

Bei der *Zusammenfassung* [15] wurden die verschiedenen Strukturelemente [12] des jeweiligen Schulbuches dem Lesefluss folgend einzeln bearbeitet.

- *Paraphrasiert* wurden Text und Experimentierangaben.
- *Wörtlich übernommen* wurden Kapitel- und Abschnitts-Überschriften, Merkstoff sowie Abbildungs-Unterschriften und Tabellen-Überschriften, stellenweise auch Text oder Experimentierangaben.

Ausgelassen wurden Aufgaben und Experimentierangaben *nach diesbezüglich zusammenfassendem Merkstoff*, denn sie dienen weder der Einführung noch der Erarbeitung und sind somit nicht charakteristisch für den didaktischen Zugang.

Ausgelassen wurden ebenso Buchabschnitte über das Auge und andere *komplexe Linsensysteme* wie Fernrohr, Mikroskop, Kamera und Projektor, denn in den Schulbüchern folgen sie erst nach den Grundlagen zur Linsenabbildung und ändern somit nichts am grundsätzlichen Zugang zur Linsenabbildung.

3.2. Explikation

Eine *Explikation* [15] erfolgte vor allem für Abbildungen und Tabellen, da sie erläuterungsbedürftig sind. Die Erläuterung erfolgte vor dem Hintergrund des zugehörigen Schulbuchtextes, und zwar aus kritischer, fachlicher Sicht.

3.3. Strukturierung

Bei der *Strukturierung* [15] kam es auf den schulbuchgemäßen Zusammenhang zwischen dem *Phänomen* des Bildes und dem *Modell* des Strahls an. Dementsprechend wurden die phänomenologische Methode [13] und die verallgemeinerte Modellmethode [14] als Analyseraster genutzt.

Die *phänomenologische Methode* [13] besteht aus vier Schritten (P1-P4), deren Schwerpunkt in der Phänomenwelt liegt: Alltagsnahe Erscheinungen beschreiben (P1); Erscheinungen experimentell abwandeln (P2); Erscheinungsweisen geordnet darstellen (P3); Ausgewählte Zusammenhänge formal beschreiben (P4).

Die *verallgemeinerte Modellmethode* [14] besteht aus vier Schritten (M0-M3), deren Schwerpunkt in der Modellwelt liegt: Phänomen beobachten (M0); Modell entwickeln (M1); Modell anwenden (M2); Modell bewerten (M3).

Durch Zusammenführung beider Methoden wurde ein grobes Analyseraster erstellt (Tab. 1).

Kategorie	Definition
P1	Alltagsnahe Erscheinungen beschreiben
P2	Erscheinungen experimentell abwandeln
P3	Erscheinungsweisen geordnet darstellen
P4	Ausgewählte Zusammenhänge formal beschreiben
M1	Modell entwickeln
M2	Modell anwenden
M3	Modell bewerten

Tab. 1: Hauptkategorien von Lernhandlungen.

Zur Herausarbeitung von Lernhandlungen wurde dieses Kategoriensystem auf das zusammengefasste und explizierte Schulbuchmaterial angewandt. Jedem Strukturelement wurde mindestens eine der Hauptkategorien zugeordnet (z.B. P1), und für die schulbuchgemäßen Lernhandlungen wurden Unterkategorien gebildet (z.B. P1L1 und P1L2).

Zur Darstellung schulbuchgemäßer Lernwege wurden die Lernhandlungen in ein Koordinatensystem eingetragen: Die horizontale Achse gibt die Abfolge der Strukturelemente an, die vertikale Achse stellt die Kategorien P1-M3 dar.

4. Ergebnisse

4.1. Schulbuchgemäße Lernhandlungen

Insgesamt liefern die Schulbücher vielfältiges Material für phänomenbasierten [16] und modellorientierten Unterricht [14] zur Linsenabbildung (Tab. 2-8).

Kategorie	Definition	Ankerbeispiel
P1L1	Lichtfleck mit Linse im Sonnenlicht erzeugen	„Mit einer Linse kann man Sonnenlicht in einem Punkt bündeln.“ ([11], S. 72)
P1L2	Linse oder Wassertropfen als Lupe nutzen	„Die ‚Flohlupe‘ [...] war ein notwendiger Gebrauchsgegenstand.“ ([9], S. 65)

Tab. 2: Lernhandlungen zur Beschreibung von alltagsnahen Erscheinungen der Linsenabbildung.

Kategorie	Definition	Ankerbeispiel
P2L1	Ausgedehnte Lichtquelle unscharf abbilden	„Wird hinter das Loch im Vorhang eine Sammellinse gehalten, so wird das Bild heller, aber in den meisten Fällen auch undeutlicher.“ ([10], S. 79)
P2L2	Ausgedehnte Lichtquelle scharf abbilden	„Mit einer Sammellinse erzeugen wir [...] das Bild einer brennenden Kerze.“ ([9], S. 70)
P2L3	Punktförmige Lichtquelle(n) mit großer Lochblende abbilden	„Eine Lochkamera bildet jeden Lichtpunkt als kleinen Bildfleck ab.“ ([8], S. 60)
P2L4	Punktförmige Lichtquelle(n) unscharf abbilden	„Der Glühdraht stellt annähernd eine punktförmige Lichtquelle dar. [...] Stelle den Schirm dicht hinter die Linse und schiebe ihn langsam weg. Wie verändert sich der Lichtfleck?“ ([8], S. 59)
P2L5	Punktförmige Lichtquelle(n) scharf abbilden	„Erzeuge mit einer Sammellinse das Bild einer kleinen Glühlampe.“ ([8], S. 59)
P2L6	Durch Linse schauen	„Ein Betrachter sieht allerdings beim Blick durch die Linse virtuelle Bilder, [...]“ ([9], S. 73)
P2L7	Linse teilweise abdecken	„Dann wird die obere Hälfte der Linse mit einem undurchsichtigen Gegenstand abgedeckt.“ ([9], S. 70)
P2L8	Breites Lichtbündel durch Zylinderlinse lassen	„Zur genauen Betrachtung ist es zweckmäßig, das [breite] Lichtbündel mit geeigneten Blenden in schmalere Teilbündel zu zerlegen.“ ([10], S. 77)
P2L9	Schmale(s) Lichtbündel durch Zylinderlinse lassen	„Wir lassen schmale Lichtbündel mit parallelen Begrenzungen aus verschiedenen Richtungen auf eine Linse treffen und beobachten die Lichtwege.“ ([9], S. 66)

Tab. 3: Lernhandlungen zur experimentellen Abwandlung von Erscheinungen der Linsenabbildung.

Kategorie	Definition	Ankerbeispiel
P3L1	Qualitative Zusammenhänge zwischen Messgrößen formulieren	„Je kleiner die Gegenstandsweite ist, desto größer ist das Bild.“ ([11], S. 73)
P3L2	Abbildungsfälle unterscheiden	„Die Tabelle [...] zeigt, dass es dabei ganz besondere Abbildungsfälle für spezielle Werte von g und b gibt.“ ([10], S. 79)

Tab. 4: Lernhandlungen zur übersichtlichen Darstellung von Erscheinungsweisen der Linsenabbildung.

Kategorie	Definition	Ankerbeispiel
P4L	Formel aus Messergebnissen herleiten	„Messungen [...] ergeben die Werte in Tabelle 3. Ein Vergleich der Quotienten $b : g$ und $B : G$ zeigt, dass beide etwa gleich sind. Es gilt das Abbildungsgesetz: $B/G = b/g = A$ [...]. Werden [...] die Abstände vom Gegenstand bzw. Bild zum Brennpunkt betrachtet [...], so folgt mit denselben Messwerten die [...] Beziehung: $(g - f) \cdot (b - f) = f^2$ “ [9], S. 73)

Tab. 5: Lernhandlungen zur formalen Beschreibung von ausgewählten Zusammenhängen bei der Linsenabbildung.

Kategorie	Definition	Ankerbeispiel
M1L1	Schmale Lichtbündel als Strahlen denken	„Wir denken uns schmale Lichtbündel als Lichtstrahlen.“ ([11], S. 73)
M1L2	Ausgezeichnete Strahlen definieren	„Ein Parallelstrahl wird so gebrochen, dass er dann durch den Brennpunkt verläuft. [...] Ein Brennpunktstrahl wird so gebrochen, dass er dann parallel zur optischen Achse verläuft. [...] Ein Mittelpunktstrahl geht ungebrochen durch eine Sammellinse.“ ([7], S. 112)

Tab. 6: Lernhandlungen zur Entwicklung des Strahlenmodells an der Linse.

Kategorie	Definition	Ankerbeispiel
M2L1	Lichtausbreitung beschreiben	„Wir betrachten einen Lichtstrahl, der auf eine Glaskugel trifft [...].“ ([9], S. 68)
M2L2	Bildentstehung erklären / vorhersagen	„Mithilfe von Parallelstrahl, Brennstrahl und Mittelpunktstrahl lässt sich das bei einer Linse entstehende Bild ganz leicht konstruieren.“ ([10], S. 77)
M2L3	Formel aus Strahlenkonstruktion herleiten	„Aus dieser Konstruktion des optischen Bilds wird die Linsengleichung hergeleitet.“ ([6], S. 160)

Tab. 7: Lernhandlungen zur Anwendung des Strahlenmodells an der Linse.

Kategorie	Definition	Ankerbeispiel
M3L	Ausgezeichnete Strahlen als reine Konstruktionslinien einstufen	„Dabei spielt es keine Rolle, ob die eingezeichneten Lichtstrahlen überhaupt die Linse treffen oder nicht, denn es handelt sich nur um Hilfslinien zur Konstruktion.“ ([11], S. 73)

Tab. 8: Lernhandlungen zur Bewertung des Strahlenmodells an der Linse.

4.2. Schulbuchgemäße Unterrichtsgänge

In den einzelnen Schulbüchern sind die verschiedenen Arten von Lernhandlungen ansatzweise so angeordnet, dass ein Übergang von optischen Phänomenen zum Strahlenmodell stattfindet (Abb. 2-7).

Der Schwerpunkt liegt meist in der Modellwelt. Besonders modell-lastig sind der *Dorn-Bader* [6], der *Duden* [7] und die *Impulse* [9], siehe Abbildungen 2, 3 und 5.

Gemäß allen Schulbüchern—außer *Fokus Physik* [8]—sollen zunächst schmale Lichtbündel verwendet werden, um den Strahlenverlauf durch die Linse zu untersuchen. Danach sollen der Brennpunktstrahl, Mittelpunktstrahl und Parallelstrahl genutzt werden, um Bildpunkte als Strahlenschnittpunkte zu konstruieren.

Nur im *Fokus*-Schulbuch [8] wird die Strahlengeometrie auf Grundlage des erzeugten Bildes erarbeitet: In Experimentierangaben wird der Mittelpunktstrahl als geradlinige Verbindung zwischen Gegenstands- und Bildpunkt eingeführt; in schematischen Zeichnungen werden Randstrahlen als Verbindungen zum Linsenrand angedeutet, vgl. [19].

M3	M3L	
M2	M2L3	
	M2L2	
	M2L1	
M1	M1L2	
	M1L1	
P4	P4L	
P3	P3L2	
	P3L1	
P2	P2L9	
	P2L8	
	P2L7	
	P2L6	
	P2L5	
	P2L4	
	P2L3	
	P2L2	
	P2L1	
P1	P1L2	
	P1L1	

Abb. 2: Unterrichtsgang gemäß Dorn-Bader [6].

M3	M3L	
M2	M2L3	
	M2L2	
	M2L1	
M1	M1L2	
	M1L1	
P4	P4L	
P3	P3L2	
	P3L1	
P2	P2L9	
	P2L8	
	P2L7	
	P2L6	
	P2L5	
	P2L4	
	P2L3	
	P2L2	
	P2L1	
P1	P1L2	
	P1L1	

Abb. 3: Unterrichtsgang gemäß Duden [7].

M3	M3L	
M2	M2L3	
	M2L2	
	M2L1	
M1	M1L2	
	M1L1	
P4	P4L	
P3	P3L2	
	P3L1	
P2	P2L9	
	P2L8	
	P2L7	
	P2L6	
	P2L5	
	P2L4	
	P2L3	
	P2L2	
	P2L1	
P1	P1L2	
	P1L1	

Abb. 4: Unterrichtsgang gemäß Fokus [8].

M3	M3L	
M2	M2L3	
	M2L2	
	M2L1	
M1	M1L2	
	M1L1	
P4	P4L	
P3	P3L2	
	P3L1	
P2	P2L9	
	P2L8	
	P2L7	
	P2L6	
	P2L5	
	P2L4	
	P2L3	
	P2L2	
	P2L1	
P1	P1L2	
	P1L1	

Abb. 5: Unterrichtsgang gemäß Impulse [9].

M3	M3L	
M2	M2L3	
	M2L2	
	M2L1	
M1	M1L2	
	M1L1	
P4	P4L	
P3	P3L2	
	P3L1	
P2	P2L9	
	P2L8	
	P2L7	
	P2L6	
	P2L5	
	P2L4	
	P2L3	
	P2L2	
	P2L1	
P1	P1L2	
	P1L1	

Abb. 6: Unterrichtsgang gemäß Spektrum [10].

M3	M3L	
M2	M2L3	
	M2L2	
	M2L1	
M1	M1L2	
	M1L1	
P4	P4L	
P3	P3L2	
	P3L1	
P2	P2L9	
	P2L8	
	P2L7	
	P2L6	
	P2L5	
	P2L4	
	P2L3	
	P2L2	
	P2L1	
P1	P1L2	
	P1L1	

Abb. 7: Unterrichtsgang gemäß Universum [11].

5. Diskussion

Anhand der schulbuchgemäßen Lernhandlungen und Lernwege wollen wir nun diskutieren, wie herkömmlicher Unterricht zu Lernschwierigkeiten und Fehlvorstellungen beiträgt.

5.1. Brennpunkt statt Sonnenbild

Bei einer Linse im Sonnenschein wird die Erscheinung in der Brennebene als heller Fleck, helle Stelle, oder sogar als Punkt bezeichnet:

„Lenke Sonnenlicht durch eine [...] Linse auf ein Blatt Papier. [...] In einem bestimmten Abstand zwischen Linse und Papier entsteht ein sehr kleiner, heller **Fleck** [Herv. SG].“ ([9], S. 66)

„Hält man ein Brennglas geschickt in die Sonne, dann kann man damit ein Stück Papier entzünden [...]. [...] Brenngläser gehören zu den Sammellinsen. [...] Sammellinsen lenken durch Brechung alle zur Achse parallelen Lichtstrahlen ungefähr durch einen **Punkt** [Herv. SG] auf der anderen Seite der Linse.“ ([6], S. 156)

„Fallen Lichtbündel auf einen solchen Glaskörper [wie die Lupe], so wird das Licht gebündelt und es entsteht eine **Stelle** [Herv. SG], die besonders hell ist. [...] Durch eine Lupe wird also ein Lichtbündel so gebrochen, dass es hinter dem Glaskörper in einem **Punkt** [Herv. SG] zusammenläuft, gesammelt wird.“ ([10], S. 76)

„Mit einer Linse kann man Sonnenlicht in einem **Punkt** [Herv. SG] bündeln.“ ([11], S. 72)

„Mit einem Brennglas kannst du Papier ‚ankokeln‘. In einem bestimmten Abstand wird jedes parallele Lichtbündel im **Brennpunkt** [Herv. SG] zusammengeführt.“ ([8], S. 60)

„Bei intensivem Licht kann sich an diesem **Punkt** [Herv. SG], in dem das Licht gebündelt wird, ein Gegenstand entzünden.“ ([7], S. 101)

Dass es sich um ein Abbild der Sonne handelt, wird nicht erwähnt. Somit wird von Anfang an kein klarer Zusammenhang zwischen Strahlen und Bild hergestellt.

5.2. Konfrontation statt Anknüpfung

Ein schulbuchgemäßer Unterrichtsgang geht weniger von eigenen Bild-Beobachtungen der Lernenden aus, sondern vielmehr von Keplers [5] strahlenoptischer Theorie. Dadurch wird kaum an die holistische Denkfigur angeknüpft; die Lernenden werden mit der analytischen Denkfigur konfrontiert.

5.2.1. Theorie vor Experiment

Im *Duden*-Physikbuch wird die fertige Theorie mit fertiger Strahlenzeichnung schon vor jeglichem Experiment geliefert:

„Licht, das von einem Gegenstandspunkt P ausgeht und durch eine Sammellinse fällt, trifft hinter der Linse in einem Bildpunkt P' zusammen. Bringt man an diese Stelle einen Schirm, so erhalten wir ein scharfes Bild des Gegenstandspunktes bzw. des ganzen Gegenstands.“ ([7], S. 112)

Hier kommt Keplers Theorie der Linsenabbildung [5] wie aus dem Nichts.

5.2.2. Sprung vom Phänomen zum Modell

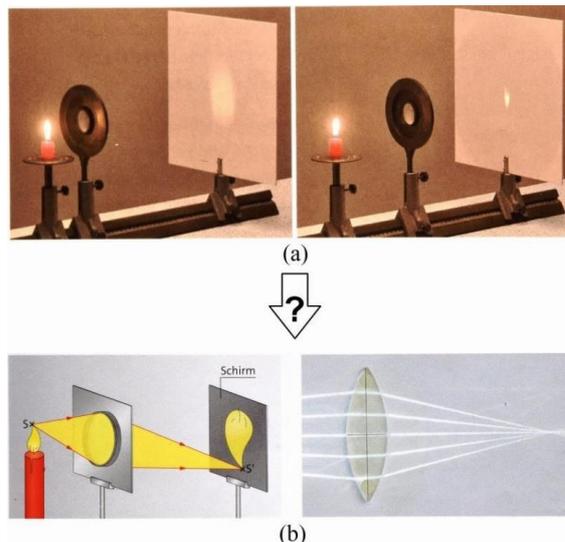


Abb. 8: Gedankenprung vom ganzen Linsenbild zum einzelnen Strahlenbündel. (a) Beobachtungen eines unscharfen und scharfen Kerzenabbildes. Bildzitat (gemäß § 51 UrhG) aus [11], S. 70. (b) Theorie der Punkt-zu-Punkt-Abbildung durch beidseitige Lichtkegel. Bildzitat (gemäß § 51 UrhG) aus [11], S. 71.

In vielen Schulbüchern geht es zwar zunächst um die Beobachtung von Linsenbildern, aber in vier der sechs analysierten Bücher [8-11] erfolgt dann ein gedanklicher Sprung zu Lichtkegeln. Die Vorstellung von Lichtkegeln ist im Experiment kaum darstellbar; sie wird deshalb durch schematische Zeichnungen (Abb. 8) und Text vermittelt:

„Linsen erzeugen Bilder, indem sie das Licht, das von einem Gegenstandspunkt auf sie trifft, in einem Bildpunkt vereinigen.“ ([11], S. 71)

„Alles Licht, das von einem Punkt P der Kerzenflamme auf die Linse fällt, wird von dieser im Punkt P' gesammelt.“ ([10], S. 79-80)

Der Zusammenhang zwischen dem ganzen Bild und einzelnen Lichtkegeln ist aus der holistischen Sicht der Lernenden [1-4] nicht unmittelbar nachvollziehbar:

- Der Gegenstand soll gedanklich in *leuchtende Punkte* zerlegt werden (dies fällt vielen Lernenden besonders schwer [17,18]),
- es soll angenommen werden, dass jeder Gegenstandspunkt *kegelförmig* zur Linse leuchtet (dies ist grundsätzlich nicht beobachtbar);
- ebenso soll das ganze Bild in *einzelne Punkte* zerlegt werden (dies widerspricht der holistischen Denkfigur [1-4] der Lernenden),
- und es soll angenommen werden, dass zu jedem Bildpunkt ein *Lichtkegel* führt (dies wäre nur bei Nutzung einer punktförmigen Lichtquelle in einem vernebelten Raum zu sehen).

Es fehlen Zwischenschritte, die von der Beobachtung des ganzen Bildes zur Vorstellung von einzelnen Strahlenkegeln führen. Damit die Lernenden von ihrem alltäglichen Standpunkt zum wissenschaftlichen Standpunkt gelangen, müssen sie also einen großen Sprung machen.

5.2.3. Strahlen vor Bildpunkten

Nicht ganz so groß ist der Gedankensprung, wenn man erst die Strahlenverläufe an der Linse untersucht und dann das Bild einer Punktlichtquelle als Strahlenschnittpunkt deutet:

„Die drei **ausgezeichneten Strahlenverläufe** sind: **a)** achsenparalleler Strahl \rightarrow Brennpunktstrahl **b)** Brennpunktstrahl \rightarrow achsenparalleler Strahl **c)** Mittelpunktstrahl bleibt Mittelpunktstrahl [...] Nach *Versuch 1* schneiden sich alle von einem Punkt A ausgehenden Lichtstrahlen, die durch die Linse gehen, hinter der Linse in einem Punkt A'. An dieser Stelle muss der Schirm stehen, damit A scharf abgebildet wird. Die maßstäbliche Zeichnung verdeutlicht, dass unter den Lichtstrahlen, die sich im Bildpunkt A' schneiden, auch die drei ausgezeichneten Strahlen sind.“ ([6], S. 157-158, Herv. im Original)

In diesem Fall wird der Strahlengang an der Linse erarbeitet, bevor ein Verständnis der Linsenabbildung angestrebt wird. Dieses Vorgehen entspricht jedoch nicht der ganzheitlichen Sicht [1-4] der Lernenden, sondern der analytischen Sicht [5] von Johannes Kepler.

5.3. Vertauschung von Phänomen und Modell

In allen Schulbüchern—bis auf eins [8]—wird das Strahlenmodell durch schmale Lichtbündel zum Phänomen gemacht; im Gegenzug muss das ursprüngliche Phänomen des Bildes hinzugedacht werden.

5.3.1. Das Lichtbündel als Anschauungs-Modell

In fünf der sechs analysierten Schulbücher werden die Strahlen bei Linsenversuchen nicht nur hinzugedacht, sondern durch schmale Lichtbündel angeblich auch beobachtbar gemacht (Abb. 9):

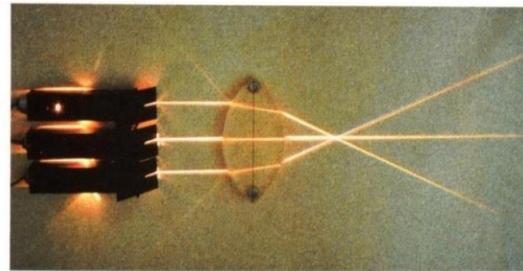
„Wir lassen schmale Lichtbündel mit parallelen Begrenzungen aus verschiedenen Richtungen auf eine Linse treffen und beobachten die Lichtwege.“ ([9], S. 66)

„Um Bildpunkte bei Linsen leicht konstruieren zu können, [...] denken [wir] uns schmale Lichtbündel als Lichtstrahlen.“ ([11], S. 73)

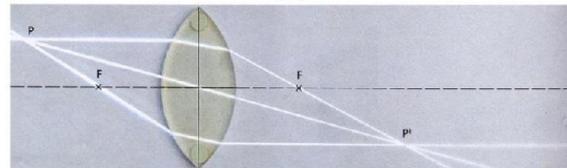
Aus didaktischer Sicht handelt es sich um ein *Anschauungs-Modell*: Die Lehrperson nutzt die schmalen Lichtbündel, um das *Denkmodell* der Strahlen zu veranschaulichen.

Aus Sicht der Lernenden erscheinen die Lichtbündel jedoch nicht als Modell, sondern als Phänomen. Wenn Lernende die schmalen Lichtbündel als Strahlen denken sollen, deuten sie Strahlen oft als Lichtbestandteile fehl [3]—zumal die Unterrichtssprache diese Fehldeutung nahelegt: In vielen Schulbüchern

ist von Strahlen die Rede, die von einem Gegenstandspunkt *ausgehen*, dann die Linse *treffen*, dort *eintreten* und *hindurchgehen*.



(a)



(b)

Abb. 9: Feine Lichtbündel an der Zylinderlinse. Bildzitate (gemäß § 51 UrhG) aus (a) [7], S. 101, und (b) [11], S. 72.

5.3.2. Das Lichtbündel als Ersatz-Phänomen

Aus fachlicher Sicht sind die schmalen Lichtbündel auf der Tafel oder dem Tisch eigentlich Schattenbilder der durchleuchteten Spaltblenden. Das ursprüngliche Phänomen des konkreten Bildes eines Gegenstandes wird somit ersetzt durch das modellhafte Phänomen abstrakter Spaltbilder. Die Spaltbilder werden im Schulbuch aber nicht als solche, sondern als Lichtbündel bezeichnet.

Das Strahlenmodell wird also anhand verkappter Spaltbilder in die Phänomenwelt geholt; gleichzeitig wird das Phänomen der Linsenabbildung anhand eines theoriebeladenen Versuchsaufbaus in die Modellwelt entrückt (Abb. 9):

- Ein *einzelner* Gegenstandspunkt wird anhand *mehrerer* Spaltleuchten modelliert,
- der Querschnitt einer *sphärischen* Linse wird als *zylindrische* Linse modelliert,
- das Bild eines *punktförmigen* Gegenstands wird als Schnittpunkt von *linienförmigen* Spaltbildern modelliert.

Während die Lehrperson die Lichtwege *veranschaulicht*, müssen sich die Lernenden den Gegenstand, dessen Bild und die dritte Dimension der Linse *hinzudenken*.

Hierbei sind Fehlzuordnungen zwischen Gegenstandspunkt, Strahlen und Bildpunkt fast unvermeidbar, denn die Lehrperson modelliert die Leuchtwirkung eines einzelnen Gegenstandspunkts anhand mehrerer Spaltleuchten:

- Für einen *unendlich fernen* Gegenstandspunkt verlaufen die Strahlen vor der Linse ungefähr parallel. Dementsprechend muss die Lehrperson die Spaltleuchten parallel zueinander ausrichten. Sie erzeugt somit mehrere

Lichtbündel, die vor der Linse parallel zueinander verlaufen und hinter der Linse sich annähernd im Brennpunkt schneiden (Abb. 9(a)). In diesem Fall befindet sich jede der Spaltleuchten wesentlich näher an der Linse als der darzustellende Gegenstandspunkt.

- Für einen *nahen Gegenstandspunkt* verlaufen die Strahlen vor der Linse divergent. Um dies mit den Spaltleuchten darstellen zu können, muss die Lehrperson die Lichtbündel zunächst zum angedachten Gegenstandspunkt hin konvergieren lassen, ehe sie zur Linse hin divergieren (Abb. 9(b)). In diesem Fall ist jede der Spaltleuchten ferner von der Linse als der darzustellende Gegenstandspunkt.

In beiden Fällen nutzt die Lehrperson mehrere Spaltleuchten, um mehrere Strahlen von *ein und demselben Gegenstandspunkt* zu veranschaulichen.

Aus Sicht der Lernenden liegt es jedoch nahe, unterschiedliche Spaltleuchten als *unterschiedliche Gegenstandspunkte* zu deuten. Aus dieser Sicht wird klar, wie die hybride Denkfigur entsteht: Die Lernenden missverstehen die Anordnung der Spaltleuchten als Anordnung von Gegenstandspunkten; somit ordnen sie verschiedenen Lichtbündeln fälschlicherweise verschiedene Bildpunkte zu, vgl. Abb. 9(a) und 1(c). Dementsprechend fällt es vielen Lernenden schwer, mit Strahlenkonstruktionen Bildeigenschaften vorherzusagen [3,20-23].

5.4. Vernachlässigte Modell-Bewertung

Die Bewertung des Strahlenmodells kommt bei der Linsenabbildung zu kurz. Zum einen wird nicht diskutiert, ob die schmalen Lichtbündel im Experiment tatsächlich die Lichtwege anzeigen. Zum anderen wird oft nicht erklärt, warum man einen Bildpunkt mit Strahlen konstruieren kann, die an der Linse vorbeigehen.

5.4.1. Der Strahl als Lichtweg

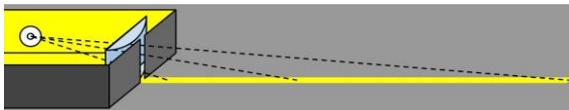


Abb. 10: Lichtwege an der Spaltleuchte. Zwischen Spaltblende und Spaltbild muss man sich mehrere Lichtwege vorstellen; sie sind als gestrichelte Linien dargestellt.

Genau genommen sind die Lichtwege mit der Haft- oder Tischoptik nicht beobachtbar. Ein Lichtweg verläuft nämlich nicht entlang der Lichtspur an der Tafel oder auf dem Tisch. Vielmehr verläuft ein Lichtweg jeweils schräg von einem Punkt der durchleuchteten Spaltblende zum entsprechenden Punkt des Spaltbildes (Abb. 10). Folglich ist anhand der Haft- oder Tischoptik nur eine verzerrte Version des Strahlenverlaufs ablesbar.

Diese Modellkritik fehlt in den Schulbüchern. Sie würde dabei helfen, zwischen dem Modell des Strahls (also des hinzugedachten Lichtweges) und dem Phänomen des feinen Lichtbündels (also des beobachtbaren Spaltbildes) zu unterscheiden.

5.4.2. Der Strahl als Konstruktionslinie

Nur in vier der sechs analysierten Schulbücher [6,9-11] werden Strahlen als reine Konstruktionshilfen bezeichnet:

„Dabei spielt es keine Rolle, ob die eingezeichneten Lichtstrahlen überhaupt die Linse treffen oder nicht, denn es handelt sich nur um Hilfslinien zur Konstruktion.“ ([11], S. 73)

Hier wird den Lernenden jedoch nicht erklärt, wieso man Parallel- und Brennpunktstrahlen auch dann verwenden kann, wenn sie die Linse verfehlen.

Nur in einem der sechs Schulbücher wird die Nutzung von vorbeigehenden Strahlen begründet, und zwar mithilfe eines Umkehrschlusses:

„Deckt man einen Teil der Linse ab, [...] dann wird das [...] Bild [...] dunkler, bleibt aber vollständig [...]. Zur Bildkonstruktion darf man deshalb auch Lichtstrahlen verwenden, die in Wirklichkeit gar nicht durch die Linse gehen würden.“ ([9], S. 72)

In einem anderen Schulbuch wird das Problem der vorbeigehenden Strahlen umgangen, indem man nicht den Querschnitt der Linse, sondern nur dessen Mittellinie einzeichnet:

„Fotografiert man einen hohen Turm [...], dann wird klar, dass die Ausdehnung der Linse für die Abbildung von untergeordneter Bedeutung ist. Bei der Konstruktion zeichnet man deshalb nur die Mittelebene und die optische Achse. Die Linse selbst kann man andeuten oder ganz weglassen.“ ([6], S. 159)

In keinem der Schulbücher wird den Lernenden eine Konstruktionsmethode für beliebige Strahlen [19,24,25] gezeigt, mit der man die tatsächlichen Lichtwege durch die Linse zeichnen könnte. Solch eine alternative Konstruktionsmethode wäre jedoch plausibler, da Strahlen zuvor als Lichtwege eingeführt worden sind: Lichtwege, die an der Linse vorbeiführen, können nämlich nicht abknicken – bei der herkömmlichen Konstruktion tut man jedoch so, als ob sie es können.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In allen analysierten Schulbüchern—außer *Fokus Physik* [8]—wird Keplers strahlenoptische Theorie der Linsenabbildung durch Modellversuche mit schmalen Lichtbündeln vermittelt. Auf diese Weise trägt schulbuchgemäßer Unterricht dazu bei, dass viele Lernende eine hybride Denkfigur entwickeln:

Bei der Veranschaulichung der Strahlengeometrie anhand schmaler Lichtbündel ist die Fehldeutung von Strahlen als Lichtbestandteile fast unvermeidbar—zumal meist so geredet wird, als ob sich Strahlen bewegen.

Zudem erschweren die Spaltleuchten zur Erzeugung der schmalen Lichtbündel die richtige Zuordnung zwischen Strahlen und Bild, vgl. Abb. 9(a) und 1(c).

Aber wie sieht eine Alternative zu diesem strahlenbasierten Zugang aus? Wie kann die Lehrperson die Strahlengeometrie an der Linse *ohne* Lichtbündel veranschaulichen? Wie kann die Lehrperson an die holistische Sicht der Lernenden *anknüpfen*, statt die Lernenden vorschnell mit der analytischen Sicht Keplers zu konfrontieren?

Die Lehrperson kann einen *bildbasierten* Zugang zur Linsenabbildung anbieten [24], vgl. [25]. Hierbei betrachten die Lernenden das Gesamtbild als Überlagerung von vollständigen Einzelbildern; anhand von Verbindungslinien zwischen diesen Einzelbildern erarbeiten sie die Strahlengeometrie. Dadurch können die Lernenden den Modellcharakter der Strahlen erkennen und den Zusammenhang zwischen Bildern und Strahlen verstehen [25-27].

7. Literatur

- [1] Galili, I., Bendall, S., & Goldberg, F. (1993). The effects of prior knowledge and instruction on understanding image formation. *J. Res. Sci. Teach.* 30, 271-301.
- [2] Galili, I. (1996). Students' conceptual change in geometrical optics. *Int. J. Sci. Educ.*, 18, 847-868.
- [3] Galili, I., & Hazan, A. (2000). Learners' knowledge in optics: interpretation, structure and analysis. *Int. J. Sci. Educ.* 22, 57-88.
- [4] Hubber, P. (2005). Explorations of Year 10 students' conceptual change during instruction. *APFSLT*, 6(1), 1-27
- [5] Kepler, J. (1904). *Dioptrik oder Schilderung der Folgen, die sich aus der unlängst gemachten Erfindung der Fernrohre für das Sehen und die sichtbaren Gegenstände ergeben.* (F. Plehn, Übers.). Leipzig: Wilhelm Engelmann.
- [6] Bader, F., & Oberholz, H.-W. (Hrsg.). (2003). *Dorn-Bader Physik: Gymnasium, Sekundarstufe I.* Hannover: Schroedel.
- [7] Meyer, L., & Schmidt, G.-D. (Hrsg.). (2015). *Physik: Lehrbuch für die Sekundarstufe I, Gymnasium, Baden-Württemberg, Band 1.* Berlin: Duden.
- [8] Boysen, G., Heise, H., Lichtenberger, J., Schepers, H., Schlichting, H. J., & Schön, L.-H. (Hrsg.). (2007). *Fokus Physik: Gymnasium, Baden-Württemberg, Band 1.* Berlin: Cornelsen.
- [9] Dekorsy, K., Gutjahr, U., Höfer, T., Karsten, F., Maier, J., Mittag, A., ... Wolf, M. (Hrsg.). (2006). *Impulse Physik 1 für die Klassen 7 / 8 der Gymnasien in Baden-Württemberg.* Stuttgart: Klett.
- [10] Appel, T., Eiselt, F., Küchenberg, F., Lechner, H., Müller, M., Serret, R., ... Ulrich, P. (Hrsg.). (2006). *Spektrum Physik 1 – Neubearbeitung: Baden-Württemberg 7/8, Gymnasium.* Braunschweig: Schroedel.
- [11] Kienle, R., & Pardall, C.-J. (Hrsg.). (2014). *Universum Physik: Gymnasium, Baden-Württemberg, Band 1.* Berlin: Cornelsen.
- [12] Merzyn, G. (1994). *Physikschulbücher, Physik-lehrer und Physikunterricht: Beiträge auf der Grundlage einer Befragung westdeutscher Physiklehrer.* Kiel: Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel.
- [13] Müller, M. (2017). *Grammatik der Natur: Von Wittgenstein Naturphänomene verstehen lernen.* Berlin: Logos. doi:10.5281/zenodo.343889
- [14] Leisner-Bodenthin, A. (2006). Zur Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht. *ZfDN*, 12, 91-109.
- [15] Mayring, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken. 11., aktualisierte und überarbeitete Auflage.* Weinheim; Basel: Beltz.
- [16] Westphal, N., Schön, L.-H., Grebe-Ellis, J. (2011). Die Merkmale phänomenbasierten Physikunterrichts. *PhyDid B*, DD 23.02.
- [17] Kiupel, M. (2000). Geometrische Optik – ohne Lichtstrahlen. *NiU Physik*, 11, 44-46.
- [18] Wiesner, H. (1986): Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten im Bereich der Optik. *NiU. Physik/Chemie* 34(13), 25-29.
- [19] Muckenfuß, H. (1996). Vorschläge zur Komplexitätsreduktion bei der Abbildung mit Sammellinsen. *Praxis der Naturwissenschaften. Physik*, 45(8), 14-16.
- [20] Goldberg, F. M., & McDermott, L. C. (1987). An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. *Am. J. Phys.*, 55, 108-119. doi: 10.1119/1.15254
- [21] Kaltakci-Gurel, D., Eryilmaz, A., & McDermott, L. C. (2016). Identifying pre-service teachers' misconceptions and conceptual difficulties about geometrical optics. *Eur. J. Phys.*, 37, 045705. doi: 10.1088/0143-0807/37/4/045705
- [22] Tural, G. (2015). Cross-grade comparison of students' conceptual understanding with lenses in geometric optics. *Sci. Educ. Int.*, 26, 325-343.
- [23] Mavanga, G. G. (2001). *Entwicklung und Evaluation eines experimentell- und phänomenorientierten Optikcurriculums: Untersuchung zu Schülervorstellungen in der Sekundarstufe I in Mosambik und Deutschland.* Berlin: Logos.
- [24] Grusche, S. (2016). Seeing lens imaging as a superposition of multiple views. *Phys. Educ.*, 51, 015006.
- [25] Razpet, N., & Kranjc, T. (2017). Partially covered lenses and additive color mixing. *Phys. Teach.* 55, 537-540.
- [26] Grusche, S. (2016). Präkonzepte zur Projektion eines unscharfen Bildes mit einer Linse. *PhyDid B*, DD 05.30.
- [27] Grusche, S. (2017). Developing students' ideas about lens imaging: Teaching experiments with an image-based approach. *Phys. Educ.*, 52, 044002.