



DISSERTATIONSSCHRIFT

**Konzeption, Entwicklung
und Evaluation von
Lernmaterialien
(KEEL)**

Von der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
– Fakultät I Bildungs- und Sozialwissenschaften –
zur Erlangung des Grades einer

Doktorin der Philosophie (Dr. phil)

genehmigte Dissertation von

Dorthe Behrens geb. Lamers

geboren am 09. September 1986 in Oldenburg

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie die Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil der Arbeit darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung der Autorin reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Erstgutachter: Prof. Dr. Klaus Zierer
Zweitgutachter: Prof. Dr. Michael Komorek

Tag der Disputation: 14. Juni 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	6
2.1	Allgemeindidaktische Grundlagen	7
2.1.1	Grundstruktur von Unterricht	8
2.1.2	Allgemeindidaktische Theorien und Modelle	10
2.1.3	Instructional Design	19
2.2	Didaktische Entwicklungsforschung	22
2.2.1	Problematik	23
2.2.2	Verortung	25
2.2.3	Einordnung und Beschreibung des eigenen Vorhabens	27
3	Konzeption von Lernmaterialien	31
3.1	Lernen und die Architektur des menschlichen Gedächtnisses	32
3.1.1	Arbeitsgedächtnis	35
3.1.2	Langzeitgedächtnis	40
3.1.3	Aufbau und Automatisierung von Schemata	44
3.2	Cognitive Load Theorie	49
3.2.1	Intrinsische kognitive Belastung	52
3.2.2	Extrinsische kognitive Belastung	57
3.2.3	Lernrelevante kognitive Belastung	59
3.3	Gestaltungsmaßnahmen zur Steuerung der kognitiven Belastung	61
3.3.1	Zielfreiheitseffekt	62
3.3.2	Effekt vollständig ausgearbeiteter Lösungsbeispiele	65
3.3.3	Effekt der Problemvervollständigung	73
3.3.4	Effekt der abschwächenden Unterstützung	74
3.3.5	Variabilitätseffekt	74
3.3.6	Effekt der geteilten Aufmerksamkeit	76

3.3.7	Modalitätseffekt	80
3.3.8	Redundanzeffekt	82
3.3.9	Elementinteraktivitätseffekt	83
3.3.10	Effekt der Isolation interagierender Elemente	83
3.3.11	Imaginationseffekt	86
3.3.12	Expertise-Umkehr-Effekt	87
3.3.13	Fazit, Kritik und Würdigung der Effekte der Cognitive Load Theorie	90
3.4	Allgemeine Gestaltungsmaßnahmen	92
3.4.1	Konzeption verständlicher Texte	92
3.4.2	Aufgabenkonzeption	94
4	Entwicklung der Lernmaterialien	99
4.1	Fachlicher Hintergrund - Geometrische Optik	100
4.1.1	Ausbreitung, Reflexion und Brechung von Licht	100
4.1.2	Abbildung durch Linsen	102
4.1.3	Das menschliche Auge	108
4.2	Didaktische und kognitionspsychologische Aufbereitung der Lernmaterialien	113
4.2.1	Legitimierung des Themas	113
4.2.2	Mögliche Schwierigkeiten beim Verstehen der Inhalte	116
4.2.3	Beschreibung der Lernmaterialien	117
5	Evaluation der Lernmaterialien	134
5.1	Erhebungsinstrumente	135
5.1.1	Aufgaben in den Lernmaterialien	136
5.1.2	Wissenstest	136
5.1.3	Interview	139
5.1.4	Umgang mit Gütekriterien	146
5.2	Vorstudie	147
5.2.1	Durchführung	148
5.2.2	Auswertung	151
5.2.3	Ergebnisse	154
5.2.4	Erste Anpassung der Lernmaterialien	157
5.3	Hauptstudie – Teil I	159
5.3.1	Auswertung	159
5.3.2	Beschreibung der Ergebnisse	160
5.3.3	Reliabilitätstest	170

5.3.4	Zweite Anpassung der Lernmaterialien durch Interpretation der Ergebnisse	173
5.4	Hauptstudie – Teil II	181
5.4.1	Anpassung des Wissenstests	182
5.4.2	Anpassung des Interviewleitfadens	183
5.4.3	Beschreibung der Ergebnisse	184
5.4.4	Reliabilitätstest	192
5.4.5	Vergleich beider Lernmaterialversionen	194
5.4.6	Dritte Anpassung der Lernmaterialien	201
5.5	Hauptstudie – Teil III	205
5.6	Fazit, Diskussion und Ausblick der Evaluation	209
6	Schlussbetrachtung	214
	Literaturverzeichnis	219
	Anhang	231
	Anhang zur Vorstudie	231
	Lernmaterialversion 1	231
	Wissenstest	235
	Interviewleitfaden	236
	Anhang zur Hauptstudie I	237
	Lernmaterialversion 2	237
	Kürzel zu Lernmaterialversion 2	241
	Reliabilitätstest	242
	Anhang zur Hauptstudie II	245
	Lernmaterialversion 3	245
	Kürzel zu Lernmaterialversion 3	249
	Wissenstest	250
	Interviewleitfaden	251
	Reliabilitätstest	252
	Anhang zur Hauptstudie III	255
	Abschlussversion der Lernmaterialien	255

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der Arbeit.	3
2.1	Didaktisches Dreieck.	8
2.2	Berliner Modell.	12
2.3	(Vorläufiges) Perspektivenschema zur Unterrichtsplanung.	16
2.4	ADDIE.	21
2.5	Modell zum Zusammenhang von Grundlagen-, Anwendungs- und Didaktische Entwicklungsforschung.	25
2.6	Schematische Darstellung des eigenen Vorhabens.	28
3.1	Grundmodell menschlicher Informationsverarbeitung.	34
3.2	Erweitertes Arbeitsgedächtnismodell.	37
3.3	Die Zone der nächsten Entwicklung in Zusammenhang mit der Aufgabenschwierigkeit und der Expertise.	56
3.4	Flussdiagramm – Wann ist die Anwendung der Gestaltungsmaßnahmen der Cognitive Load Theorie erforderlich?	60
3.5	Vermeidung des Aufmerksamkeitsteilungseffekts.	77
3.6	Anwenden des räumlichen Kontiguitätsprinzips.	79
4.1	Wellenfronten und Strahlen einer Kugelwelle und einer daraus resultierenden ebenen Welle ausgehend von einer Punktquelle.	101
4.2	Reflexion und Brechung eines Lichtstrahls an der Grenzfläche zweier Medien.	102
4.3	Bestimmung der Brennweite einer sphärisch gekrümmten Grenzfläche.	103
4.4	Geometrische Strahlenkonstruktion bei der Abbildung eines Gegenstandspunktes <i>A</i> durch eine sphärisch gekrümmte Grenzfläche.	104
4.5	Krümmungsradien mit verschiedenen Vorzeichen.	105

4.6	Geometrische Strahlenkonstruktion bei der Abbildung eines Gegenstandspunktes A durch eine Sammellinse.	106
4.7	Abbildung eines Gegenstandes durch eine Sammellinse. . .	107
4.8	Geometrische Strahlenkonstruktion bei der Abbildung eines Gegenstandspunktes A durch eine Zerstreuungslinse. .	108
4.9	Abbildung eines Gegenstandes durch eine Zerstreuungslinse.	108
4.10	Querschnitt des menschlichen Auges.	109
4.11	Optische Abbildung im Auge.	111
4.12	Strahlengang bei einer Myopie (Kurzsichtigkeit) und ihre Korrektur mit einer Zerstreuungslinse.	112
4.13	Strahlengang bei einer Hypermetropie (Weitsichtigkeit) und ihre Korrektur mit einer Sammellinse.	112
4.14	Kopfzeile der Lernmaterialien – Kapitel 1.	118
5.1	Vorstudie – Fehler beim Einzeichnen der drei Teilstrahlen in Kapitel 3.	155
5.2	Hauptstudie Teil I – Anzahl der aufgetretenen Fehler und Erschwernisse innerhalb der einzelnen Aufgaben beim Bearbeiten der Lernmaterialien.	161
5.3	Hauptstudie Teil I – Anzahl der aufgetretenen Fehler innerhalb der einzelnen Aufgaben beim Bearbeiten des Wissenstests.	161
5.4	Hauptstudie Teil I – Fehler beim Einzeichnen der drei Teilstrahlen in Kapitel 3.	163
5.5	Hauptstudie Teil I – Fehler beim Verändern der Position der Netzhaut und beim Ausfüllen der Lücken in Kapitel 4.	166
5.6	Hauptstudie Teil I – Fehler eines Probanden beim Einzeichnen des Weg des Lichts durch die Fehlvorstellung von Sehstrahlen.	169
5.7	Hauptstudie Teil I – Zeichnen der drei Teilstrahlen ohne Lineal in Kapitel 3.	170
5.8	Hauptstudie Teil II – Anzahl der aufgetretenen Fehler und Erschwernisse innerhalb der einzelnen Aufgaben beim Bearbeiten der Lernmaterialien.	184
5.9	Hauptstudie Teil II – Anzahl der aufgetretenen Fehler innerhalb der einzelnen Aufgaben beim Bearbeiten des Wissenstests.	185

5.10	Hauptstudie Teil II – Fehler eines Probanden beim Beschriften der Brennpunkte in Kapitel 3.	189
5.11	Hauptstudie Teil II – Fehler eines Probanden beim Konstruieren der Teilstrahlen von einem beliebigen Punkt ausgehend in Kapitel 3.	191
5.12	Hauptstudie Teil II – Konstruktion der drei Teilstrahlen ohne die Parallelität zur optischen Achse zu beachten in Kapitel 4.	192
5.13	Die Lernmaterialversionen im Vergleich – Anzahl der aufgetretenen Fehler innerhalb der einzelnen Aufgaben beim Bearbeiten der Lernmaterialien.	195
5.14	Gegenüberstellung der Anzahl der aufgetretenen Fehler und ausgelassenen Aufgaben in den 17 vergleichbaren Aufgaben beider Lernmaterialversionen.	196
5.15	Hauptstudie Teil III – Anzahl der aufgetretenen Fehler innerhalb der einzelnen Aufgaben beim Bearbeiten der Lernmaterialien.	206

Tabellenverzeichnis

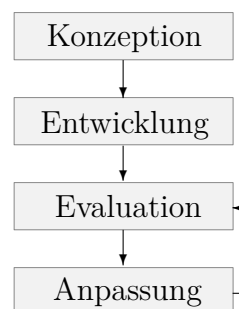
5.1	Ablauf der Vorstudie.	149
5.2	Vorstudie – Codesystem für die Auswertung.	153
5.3	Hauptstudie Teil I – Weitere Erschwernisse in den Lernmaterialien.	162
5.4	Hauptstudie Teil I – Kreuztabelle für die Beobachtungen beider Codierer in den Lernmaterialien.	171
5.5	Hauptstudie Teil I – Kreuztabelle für die Beobachtungen beider Codierer im Wissenstest.	172
5.6	Hauptstudie Teil I – Kreuztabelle für die Beobachtungen beider Codierer bei der Analyse der Interviews.	172
5.7	Hauptstudie Teil II – Weitere Erschwernisse in den Lernmaterialien.	185
5.8	Hauptstudie Teil II – Kreuztabelle für die Beobachtungen beider Codierer in den Aufgaben der Lernmaterialien. . . .	193
5.9	Hauptstudie Teil II – Kreuztabelle für die Beobachtungen beider Codierer im Wissenstest.	193
5.10	Hauptstudie Teil II – Kreuztabelle für die Beobachtungen beider Codierer bei der Analyse der Interviews.	194
5.11	Vergleichbare Aufgaben in den beiden Lernmaterialversionen.	195
5.12	Summe der Häufigkeiten der gemachten Fehler, ausgelassenen und korrekt gelösten Aufgaben innerhalb der einzelnen Kapitel.	196
5.13	Den Weg des Lichts in Form von Pfeilen gezeichnet.	199
5.14	Verwendung eines Lineals beim Zeichnen.	201
5.15	Vergleich Teil II und III – Gesamtsumme der Häufigkeiten der gemachten Fehler, ausgelassenen und korrekt gelösten Aufgaben.	206
5.16	Vergleich Teil II und III – Zeichnen der Abschnitte der Teilstrahlen als Parallelstrahlen.	207

5.17 Vergleich Teil I, II und III – Den Weg des Lichts in Form von Pfeilen gezeichnet.	208
5.18 Vergleich Teil II und III – Auslassen der Aufgaben 3A3b und 3A4b.	208

Kapitel 1

Einleitung

Die Dissertationsschrift trägt den Titel **Konzeption, Entwicklung und Evaluation von Lernmaterialien**, womit auch gleichzeitig das Ziel dieser Arbeit formuliert werden kann: Theoretische Überlegungen zur Konzeption sollen in der konkreten Entwicklung von Lernmaterialien angewendet werden. In der darauffolgenden Evaluation sollen die entwickelten Lernmaterialien hinsichtlich enthaltener Schwierigkeiten getestet werden, um sie in einem zweiten Schritt anzupassen. Mit der Anpassung wird das Ziel verfolgt, die Lernmaterialien zu verbessern. Durch eine erneute Evaluation kann zum einen festgestellt werden, ob es sich bei der Anpassung um eine Verbesserung handelt und zum anderen, ob weitere Schwierigkeiten enthalten sind.



Wird der Begriff der Lernmaterialien grob gefasst, indem sie als Materialien angesehen werden, mit denen eine bestimmte Thematik gelernt werden soll, können beispielsweise auch Schulbücher und Lernhefte als Lernmaterialien verstanden werden. Dennoch dürfen die Lernmaterialien dabei nicht schlichtweg als Medien im Unterricht verstanden werden. Eine Gegenüberstellung von herkömmlichen Unterrichtsmedien und den in dieser Arbeit konzipierten, entwickelten und evaluierten Lernmaterialien soll helfen, den Unterschied deutlich zu machen: Unter Unterrichtsmedien können nahezu alle Hilfsmittel verstanden werden, die den Lehr- und Lernprozess unterstützen. Sie dienen zur Veranschaulichung des Unterrichtsgegenstandes und können somit als Vermittler zwischen den Schü-

lern¹ und der Lehrkraft angesehen werden. Zu den Medien im klassischen Sinn zählen beispielsweise die Kreidetafel, der Tageslichtprojektor, das Arbeitsblatt sowie das Schulbuch. (Vgl. Kron 2008, S. 227) Dagegen können die in dieser Arbeit konzipierten, entwickelten und evaluierten Lernmaterialien als Instruktionsmaterialien verstanden werden, mit denen sich Schüler eine Thematik im Selbstlernprozess aneignen können. Dadurch stellen die Lernmaterialien keine Unterstützung des Unterrichtens dar, sondern sind eher als ein Ersatz anzusehen. Für die kognitionspsychologischen Überlegungen zur Konzeption der Lernmaterialien rücken besonders die Effekte der **Cognitive Load Theorie** in den Vordergrund. Die Cognitive Load Theorie liefert einen Erklärungsansatz zum multimedialen Lernen und wird beispielsweise im Bereich des E-Learning zum Erstellen von Lernsoftwares genutzt (vgl. Rey 2009, S. 36). Infolgedessen können die Lernmaterialien mit einer Lernsoftware verglichen werden, wobei sie eine schriftliche, papierbasierte Form darstellen, durch die das Lernen nicht interaktiv erfolgt. Dennoch sollen die Lernenden direkt auf den Lernmaterialien Aufgaben bearbeiten.

Der Unterschied dieser Lernmaterialien zu herkömmlichen Unterrichtsmaterialien liegt jedoch nicht nur in ihrer Konzeption und Entwicklung begründet. Vielmehr ist die Evaluation der Lernmaterialien mit dem Ziel, enthaltene Schwierigkeiten aufzudecken und diese in einem zweiten Schritt zu reduzieren, ausschlaggebend für den Unterschied. Durch dieses Vorgehen sollen die Lernmaterialien schrittweise verbessert werden. Von Verlagen veröffentlichte Unterrichtsmaterialien wie Schulbücher oder Lernhefte durchlaufen eine derartige Evaluationsschleife nicht (vgl. Wellenreuther 2010b, S. 144). Das bedeutet für die Praxis, dass es sich bei der Fülle an Materialien, die für den Unterricht oder auch das selbstständige Lernen herausgegeben werden, um Hilfsmittel handelt, die erst nach ihrer Veröffentlichung von den Lehrkräften getestet werden. So verwendet jede Lehrperson für sich eine Sammlung an Materialien und Ausschnitte dieser, die sie für ihren Unterricht als sinnvoll erachtet und die sich bereits in ihrem Unterricht bewährt hat.

Durch das Vorgehen in dieser Arbeit soll ein Beitrag zur **Didaktischen Entwicklungsforschung** geleistet werden, indem die Lernmaterialien nach empirisch belegten Konzepten entwickelt und durch eine Eva-

¹ Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden im Folgenden die generalisierenden und umfassenden männlichen Bezeichnungen verwendet. Sie schließen die weiblichen Formen mit ein.

luation auch verbessert werden. Der Schwerpunkt der Didaktischen Entwicklungsforschung liegt darin, in der Forschung belegte Theorien für die Unterrichtspraxis nutzbar zu machen. Mit der Entwicklung und Evaluation von Lernmaterialien kann ein Bindeglied zwischen der universitären Forschung und der Unterrichtspraxis geschaffen werden. (Vgl. Einsiedler 2011, S. 42) Für den Einsatz der Materialien in der Praxis ist es wichtig, dass diese keine unnötigen Erschwernisse enthalten. Aus diesem Grund werden die Lernmaterialien hinsichtlich enthaltener Schwierigkeiten evaluiert und gegebenenfalls verbessert. Das Ziel dieser Arbeit liegt in der exemplarischen Entwicklung von Lernmaterialien, die durch die Evaluation für die Unterrichtspraxis nutzbar gemacht werden.

Um diesem Anspruch gerecht zu werden und das soeben genannte Ziel zu erreichen, bietet sich ein Aufbau der Arbeit gemäß folgender überblicksartiger Darstellung an:

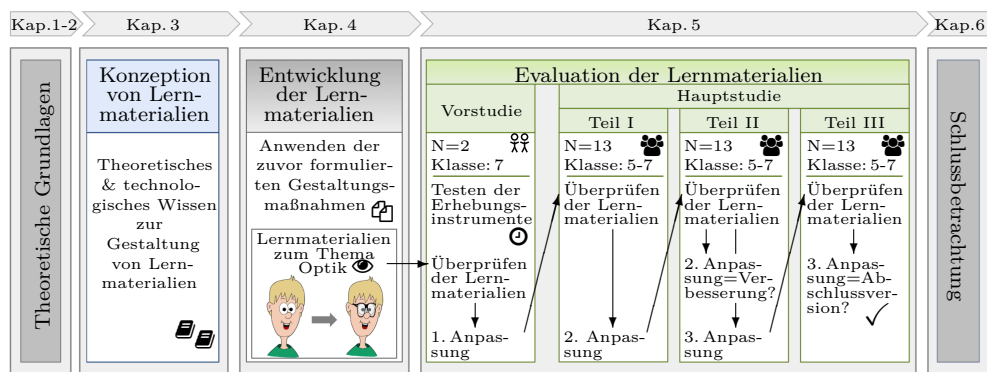


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit.

Bevor konkret auf die Konzeption, Entwicklung und Evaluation von Lernmaterialien eingegangen wird, werden in den ersten beiden Kapiteln grundlegende Überlegungen zur Allgemeinen Didaktik und zur Didaktischen Entwicklungsforschung angestellt, um einen Rahmen für das Vorgehen innerhalb dieser Arbeit zu schaffen. Dabei stehen besonders die Grundstruktur von Unterricht und Aspekte zur Unterrichtsplanung im Vordergrund. Dazu werden allgemeindidaktische Theorien und Modelle betrachtet und der Blick auf das Instructional Design gerichtet. Das eigene Vorhaben wird dementsprechend eingeordnet und vorab skizziert. Im dritten Kapitel folgt die Auseinandersetzung mit der **Konzeption von Lernmaterialien**, in der zunächst das Lernen im Vordergrund steht. Dazu wird auch auf die Architektur des menschlichen Gedächtnisses eingegangen, um darauf aufbauend den Fokus auf die Cognitive Load Theorie

zu legen, die sich mit der Belastbarkeit des Arbeitsgedächtnisses auseinandersetzt. In diesem Zusammenhang werden die Effekte der Cognitive Load Theorie thematisiert, die sich mit der Gestaltung von Lernumgebungen beschäftigen und deren Wirksamkeit mehrfach in empirischen Studien belegt ist (vgl. Rey 2009, S. 36).

Im vierten Kapitel wird der Versuch unternommen, diese Effekte für die **Entwicklung von Lernmaterialien** zu nutzen. Dazu werden jedoch zunächst fachliche Grundlagen geklärt. Die Lernmaterialien werden für das Schulfach Physik zum Thema *geometrische Optik* konzipiert, wobei auch biologische Schwerpunkte berücksichtigt werden und der Einsatz der Lernmaterialien somit auch fächerübergreifend erfolgen kann. Neben dem fachlichen Hintergrund werden didaktische Überlegungen angestellt, mit denen das Thema zunächst legitimiert wird und mögliche Hindernisse aufgezeigt werden, die ein Verstehen der Inhalte erschweren könnten. Damit sind beispielsweise Fehlvorstellungen der Schüler gemeint. Durch die konkrete Beschreibung der Lernmaterialien wird deutlich, wie die Überlegungen zur Konzeption in ihrer Gestaltung umgesetzt werden. Die Lernmaterialien zum Thema Optik besitzen exemplarischen Charakter für die Umsetzung der Effekte der Cognitive Load Theorie.

Doch auch wenn sich die Lernwirksamkeit der einzelnen Effekte in voneinander unabhängigen Studien bereits bewährt hat und diese bei der Entwicklung der Lernmaterialien eine zentrale Rolle spielen, ist dies keine Garantie für ein Gelingen der Lernmaterialien. Allerdings soll durch die **Evaluation** nicht deren Lernförderlichkeit festgestellt werden. Vielmehr geht es darum, enthaltene Schwierigkeiten innerhalb der Lernmaterialien aufzudecken. Da die Lernmaterialien für Schüler der Klassenstufe 5./6. des gymnasialen Schulzweiges entwickelt wurden, werden für die Stichprobe Schüler akquiriert, die dem Alter, der Klassenstufe und dem Schulzweig entsprechen. In der Evaluation wird ein Feedback von den Schülern über die Lernmaterialien hinsichtlich enthaltener Schwierigkeiten eingeholt. Diese Form des Feedbacks ist besonders wirksam, denn wenn eingefordert wird „was Lernende wissen, was sie verstehen, wo sie Fehler machen, wo sie falsche Vorstellungen haben [...] dann können Lehren und Lernen miteinander synchronisiert werden und wirksam sein“ (Hattie 2013, S. 206). Die durch die Studie aufgezeigten Erschwernisse werden dazu genutzt, um die Lernmaterialien zu verbessern. Danach wird die Erhebung mit der neuen Version der Lernmaterialien mit derselben Intenti-

on wiederholt, enthaltene Schwierigkeiten aufzudecken. Das Ziel der Studie ist es, die Lernmaterialien bestmöglich zu optimieren. Die Evaluation der Lernmaterialien gliedert sich in eine Vorstudie und eine Hauptstudie, wobei die Hauptstudie aus drei Schleifen besteht. In der Vorstudie, die mit einer kleinen Probandenzahl ($N=2$) durchgeführt wird, werden die Erhebungsinstrumente getestet sowie die Lernmaterialien hinsichtlich enthaltener Schwierigkeiten überprüft. Mit den ersten Ergebnissen findet eine erste Anpassung der Lernmaterialien statt, die im Hinblick auf die Stichprobengröße und das Hauptziel der Vorstudie nur geringfügige Änderungen beinhaltet. Diese Version der Lernmaterialien wird dann im ersten Teil der Hauptstudie mit 13 Probanden evaluiert und hinsichtlich der enthaltenen Schwierigkeiten angepasst. Die angepasste Version wird im zweiten Teil der Hauptstudie mit ebenfalls 13 Probanden evaluiert. Aus der Anzahl der enthaltenen Schwierigkeiten kann darauf geschlossen werden, ob es sich bei der vorigen Anpassung um eine Verbesserung der Lernmaterialien handelt. Außerdem werden diese ein weiteres Mal angepasst und im dritten Teil der Hauptstudie wird mit 13 Probanden überprüft, ob es sich bei der letzten Anpassung der Lernmaterialien um die Abschlussversion handelt. Im Anschluss daran wird nicht nur ein Ausblick der Studie gegeben, es findet auch eine Schlussbetrachtung im fünften Kapitel statt.

Wie bereits angeführt, stehen die entwickelten Lernmaterialien exemplarisch dafür, wie unter anderem die Effekte der Cognitive Load Theorie für die Unterrichtspraxis nutzbar gemacht werden können. Daneben steht auch das Vorgehen der Konzeption, Entwicklung und Evaluation exemplarisch für das Vorgehen innerhalb der Didaktischen Entwicklungsforschung, indem eine Studie durchgeführt wird, die als Ergebnis erprobte Lernmaterialien aufweisen kann, die für die Unterrichtspraxis einsatzbereit sind.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

Für die theoretischen Überlegungen dieser Arbeit rücken zunächst *allgemeindidaktische Grundlagen* in den Vordergrund. Hier wird der Begriff der Allgemeinen Didaktik definiert und auf die *Grundstruktur von Unterricht* eingegangen. In einem zweiten Schritt stehen die *allgemeindidaktischen Theorien und Modelle* im Fokus, um sich verstärkt mit den Strukturen des Unterrichts, den Unterricht bedingenden Faktoren und deren Planung auseinanderzusetzen. Dabei werden sowohl die Lerntheoretische Didaktik nach Paul Heimann als auch die Bildungstheoretische beziehungsweise Kritisch-konstruktive Didaktik nach Wolfgang Klafki betrachtet. Darauf aufbauend wird das *Instructional Design* als Wissenschaft der Planung vorgestellt, in der die Gestaltung von Instruktionsmaterialien eine zentrale Rolle spielt (vgl. Seel 1991, S. 350). Das Instructional Design kann als die englischsprachige Entsprechung zur deutschen Allgemeinen Didaktik angesehen werden (vgl. Zierer 2010, S. 37). Diese allgemeindidaktischen Überlegungen bilden die Grundlagen für die Konzeption von Lernmaterialien.

Um die Forschungen innerhalb der Bildungswissenschaften einzuordnen und einen Rahmen des eigenen Vorhabens zu schaffen, wird die *Didaktische Entwicklungsforschung* thematisiert, die versucht, theoretisch erfasste Erkenntnisse nicht nur mit dem Schulalltag zu verknüpfen, sondern auch für diesen nutzbar zu machen. Dabei wird auf bestehende Problematiken eingegangen, durch die die Didaktische Entwicklungsforschung vorangetrieben wird. Zudem wird auf ihre Positionierung hinsichtlich der Grundlagen- und Anwendungsforschung eingegangen, um danach das eigene Vorhaben zu skizzieren und einzuordnen.

2.1 Allgemeindidaktische Grundlagen

Der Begriff *Didaktik* ist hauptsächlich in Deutschland innerhalb der Bildungswissenschaften bekannt. Im angloamerikanischen Raum wird er kaum im bildungswissenschaftlichen Kontext verwendet. Die Herkunft des Begriffs ist auf das griechische Verb διδάσκειν (*didáskein*) zurückzuführen, welches mit ‚lehren, unterrichten‘ (aktiv) und ‚lernen, belehrt/ unterrichtet werden‘ (passiv) übersetzt wird. Das davon abgeleitete Substantiv δίδαξις (*dídaxis*) wird als ‚Lehre, Unterricht, Unterweisung‘ verwendet und διδασκική τέχνη (*didaktiké téchne*) bedeutet ‚Lehrkunst‘. In diesem sprachlichen Zusammenhang zeigt sich, dass der Begriff Didaktik in Verbindung mit den Begriffen Lehren, Lernen und Unterricht verwendet wird und kann so auch als *Wissenschaft des Lehrens und Lernens* deklariert werden. (Vgl. u.a. Heursen 2001, S. 307; Blankertz 1969, S. 13; Reich 1977, S. 13; Zierer 2010, S. 25)

Die Allgemeine Didaktik (und auch die Fachdidaktiken) widmen sich der Ermittlung folgender Schwerpunkte (vgl. Klafki 1994, S. 49f.):

1. Es werden die Voraussetzungen sowie die äußeren Einflussfaktoren für das Lehren und Lernen im Unterricht untersucht, zu denen beispielsweise die Bildungsstandards, Kerncurricula und Lehrpläne zählen.
2. Die Voraussetzungen seitens der am Unterricht beteiligten Personen werden untersucht, die sich direkt auf das Lehren und Lernen auswirken. In diesem Zusammenhang wird auch der Ablauf von Unterrichtsstunden sowie deren Planung betrachtet.
3. Theoretische Schemata, die Handlungsanweisungen für das Lehren und Lernen vorschlagen, werden hinsichtlich ihrer Wirkung und Effektivität analysiert.

Wenn die Didaktik als „die Wissenschaft vom Lehren und Lernen in pädagogischen Handlungsfeldern“ (Zierer 2010, S. 28) verstanden wird und innerhalb der Allgemeinen Didaktik der Fokus auf allgemeinen Prinzipien zur Beschreibung von Unterricht liegt, da sie „[unterrichtliche] Fragen auf der Ziel-, Inhalts-, Prozess- und Handlungsebene [erforscht]“ (ebd.), ist es zunächst ratsam, einen Blick auf die Grundstruktur von Unterricht zu werfen, um in einem zweiten Schritt den Fokus auf allgemeindidaktische

Theorien und Modelle zu legen und damit die drei angeführten Schwerpunkte zu konkretisieren.

2.1.1 Grundstruktur von Unterricht

Die Grundstruktur von Schulunterricht lässt sich mit dem *Didaktischen Dreieck* in Abbildung 2.1 beschreiben, das auf dem Grundmodell der Kommunikation (Sender–Empfänger–Inhalt) basiert.

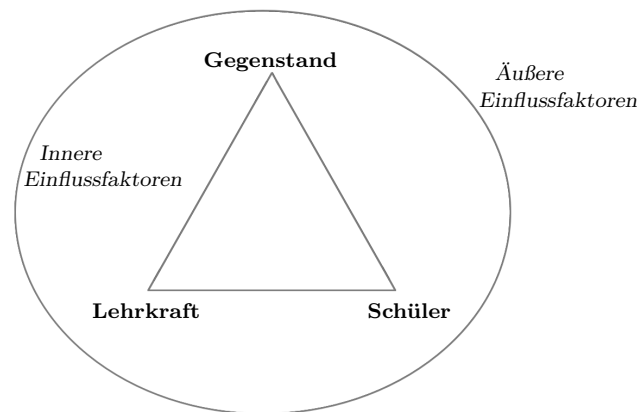


Abbildung 2.1: Didaktisches Dreieck.²

Die *Schüler* und die *Lehrkraft* begegnen sich im Unterricht durch den Unterrichtsgegenstand. Das Unterrichtsgeschehen selbst zeichnet sich einerseits durch Handlungen des Lehrers und andererseits durch Schülerhandlungen aus. So erklärt die Lehrkraft den Unterrichtsgegenstand, stellt beispielsweise Fragen an die Schüler, lobt und ermahnt sie. Die Schüler folgen der Erklärung, beobachten, antworten auf die von der Lehrkraft gestellten Fragen und stellen selbst Fragen. Da die Tätigkeiten der Schüler und der Lehrkraft somit immer in Wechselbeziehung zueinander stehen, wird deutlich, dass Unterricht durch ständige Interaktions- und Kommunikationsprozesse getragen wird. Die Kommunikation zwischen den Schülern und dem Lehrer bezieht sich dabei immer auf den Unterrichtsgegenstand beziehungsweise wird der Gegenstand der Kommunikation zum Unterrichtsgegenstand. Jedoch verläuft die Interaktion zwischen den am Unterricht beteiligten Personen nicht nur auf der Sachebene und somit rein auf den Unterrichtsinhalt bezogen, sondern es schwingt immer auch eine Beziehungsebene in den Aussagen und Handlungen mit. Dies lässt sich verdeutlichen, wenn der Schüler und die Lehrkraft als Leib-Seele-Geist-

² Abbildung modifiziert aus Glöckel 2003, S. 57.

Einheiten betrachtet werden. Neben ihrer körperlichen Anwesenheit und einer gewissen Intelligenz bringen sie vor allem auch Emotionen mit in den Unterricht, die für das schulische Lernen und Lehren eine wichtige Rolle spielen. Bezogen auf den Unterrichtsgegenstand hängen die Emotionen der Schüler auf der einen Seite mit den persönlichen Vorlieben und Interessen und auf der anderen Seite mit seiner Präsentation zusammen. Durch eine verständliche Präsentation der Inhalte kann eine positive Leistungsmotivation seitens der Schüler hervorgerufen werden. Ebenso können durch eine für die Schüler unverständliche Präsentation Unmut und Desinteresse auftreten. In diesem Zusammenhang spielen Medien als Repräsentant der Inhalte eine zentrale Rolle. Die beschriebenen Emotionen richten sich jedoch nicht nur auf den Unterrichtsgegenstand und zeigen sich durch Wissbegierde oder Ablehnung diesem gegenüber. Emotionen sind auch immer auf zwischenmenschlicher Ebene zu finden, so entwickeln sich unter den Schülern Freundschaften und Partnerschaften, aber auch Rivalitäten. (Vgl. Glöckel 2003, S. 17ff.)

Dementsprechend muss der Klassenraum auch als Lebensraum verstanden werden, in dem die Schüler und auch der Lehrer einen Teil der eigenen Lebenszeit verbringen. Dabei besitzen sowohl der zeitliche als auch der räumliche Aspekt eine subjektive und eine objektive Komponente. Unter der objektiven wird die messbare Komponente verstanden. Demnach läuft die Zeit linear ab und kann gemessen werden, ebenso besitzen Räume eine objektive Beschaffenheit, die sich durch deren Abmessungen und das jeweilige Raumkonzept ergeben. Die subjektive Komponente zielt darauf ab, wie die Zeit und der Raum empfunden werden. Demnach kann die Zeit bei einem spannenden Unterrichtsthema als sehr kurz empfunden werden und sich bei aufkommender Langeweile hinziehen.³ Bezüglich des Raumes können die Lernenden und auch die Lehrkraft durch die subjektive Komponente ein Gefühl der Geborgenheit entwickeln, wenn sie sich in dem Raum wohlfühlen. (Vgl. Zierer 2006, S. 49ff.; Zierer 2008, S. 474ff.)

In Bezug auf das Didaktische Dreieck (Abbildung 2.1) ist in diesem Zusammenhang zu betonen, dass das Unterrichtsgeschehen einer Vielzahl von Einflussfaktoren ausgesetzt ist. Diese können in *innere* und *äußere*

³ Die angesprochene Relativität der Zeit, die aufgrund der subjektiven Komponente zustande kommt, drückte Albert Einstein einst gegenüber seiner Sekretärin folgendermaßen aus: „Wenn ich mit einem Mädchen eine Stunde verbringe, dann kommt mir das vor wie zwei Minuten. Und wenn ich zwei Minuten auf einer heißen Ofenbank sitze, dann kommt mir das vor wie eine Stunde. Das ist Relativität.“ (u.a. zit. n. Kantorowicz 2005, S. 76)

Einflussfaktoren unterteilt werden. Die angesprochenen Emotionen lassen sich, neben den Vorkenntnissen der Schüler und ihrem sozialen Umfeld, den inneren Einflussfaktoren zuordnen und können auch als *aktuelle Bedingungen* des Unterrichts bezeichnet werden. Die inneren Bedingungen stehen zumeist in Wechselwirkung zueinander, da beispielsweise die Emotionen vom sozialen Umfeld abhängig sein können. Die inneren Bedingungen werden sowohl von den Schülern als auch von der Lehrkraft beeinflusst. Zu den äußeren Einflussfaktoren zählen gesellschaftliche und kulturelle Bedingungen sowie die Bildungsstandards und Kerncurricula. Die äußeren Bedingungen bilden den Rahmen für die Institution Schule. (Vgl. Glöckel 2003, S. 57f.)

2.1.2 Allgemeindidaktische Theorien und Modelle

Sinn und Zweck dieser Konstellation von den Schülern, dem Lehrer und dem Unterrichtsgegenstand ist das Stattfinden von Lehr- und Lernprozessen, durch welche die Bildung der Schüler gesichert werden soll. Dieses generelle Ziel von Schule und Unterricht ist im niedersächsischen Kerncurriculum verankert. So heißt es in dessen allgemeinen Informationen:

Grundlage von Bildung ist der Erwerb von gesichertem Verfügungs- und Orientierungswissen, das die Schülerinnen und Schüler zu einem wirksamen und verantwortlichen Handeln auch über die Schule hinaus befähigt. Den Ergebnissen von Lehr- und Lernprozessen im Unterricht kommt damit eine herausragende Bedeutung zu. (Niedersächsisches Kultusministerium 2007, S. 5)

Mit der Erreichung dieses Ziels befasst sich die Allgemeine Didaktik, wobei sich in der Entwicklung der Allgemeinen Didaktik im Laufe der Jahre zwei zentrale Theorien herauskristallisieren, die sich mit den Strukturen des Unterrichts und den Unterricht bedingenden Faktoren beschäftigen. Gemeint sind die *Lerntheoretische Didaktik* nach Paul Heimann, deren Zusammenhänge später von Wolfgang Schulz in dem *Berliner Modell* skizziert werden und die *Bildungstheoretische Didaktik* nach Wolfgang Klafki, die später von selbigem zur *Kritisch-konstruktiven Didaktik* weitergedacht wird.

Lerntheoretische Didaktik nach Paul Heimann

Der Unterricht wird durch Lehr- und Lernprozesse getragen. Der Begriff des Lernens steht bei den Überlegungen Paul Heimanns im Zentrum und liefert die Begründung für die Bezeichnung dieser Theorie als Lerntheoretische Didaktik. Heimann versucht 1962 die Strukturen des Unterrichtsprozesses aufzudecken und bezeichnet dies als *Struktur-Analyse*. Die ermittelten Strukturbegriffe bilden dabei den Rahmen der Bedingungen, die „erfüllt sein müssen, wenn von Unterricht gesprochen werden darf“ (Heimann 1962, S. 415). Es handelt sich um konstante Strukturen, die in jedem Unterrichtsprozess zu finden sind und die sich aufeinander beziehen und somit interdependent sind. Nach Heimann geht es „im Schulunterricht [...] offenbar immer darum, irgendwelche *Gegenstände* (Lernanlässe) *in bestimmter Absicht* (zu Lernzwecken) und in bestimmten *Situationen* in den Erkenntnis-, Erlebnis- und Tätigkeitshorizont von *Kindern* oder *Jugendlichen* zu bringen, wobei man sich bestimmter *Verfahrensweisen* und *Medien* bedient“ (ebd.). Darin erkennt Heimann sechs konstante Elemente: Intentionen, Inhalte, Methoden, Medien sowie anthropologisch-psychologische und situativ-sozial-kulturelle Voraussetzungen. Hinsichtlich dieser Strukturelemente kommt der Lehrkraft eine doppelte Funktion zu: Sie plant einerseits und reflektiert andererseits ihren Unterricht im Hinblick auf diese sechs Faktoren. Wolfgang Schulz skizziert 1969 die von Heimann beschriebenen Zusammenhänge der Unterrichtsstrukturen sowie deren Voraussetzungen und Folgen in Form des *Berliner Modells*, welches innerhalb der Lerntheoretischen Didaktik einen zentralen Stellenwert einnimmt.⁴ Die Lehrkraft muss im Vorfeld entscheiden, „*welche Absichten an welchen Inhalten* unter Verwendung *welcher Methoden* und *Medien* verwirklicht werden sollen“ (Heimann 1962, S. 416). In Bezug auf das Berliner Modell heißt das konkret: Es müssen *Entscheidungen* hinsichtlich der Intentionen, der Themen, der Verfahren und der Medien⁵ getroffen werden, durch die der Lehr-Lernprozess strukturiert werden soll. Dieses Feld der Struktur-Analyse bezeichnet Heimann als *Entscheidungsfeld* und er erwei-

⁴ Wolfgang Schulz ist ein ehemaliger Mitarbeiter von Paul Heimann. Heimann selbst hat das Berliner Modell nie gezeichnet, seine Überlegungen werden von Schulz aufgegriffen und innerhalb des Berliner Modells zusammengefasst.

⁵ Heimann verwendet ursprünglich andere Begrifflichkeiten für die Strukturelemente des Entscheidungsfeldes als in Abbildung 2.2 zu sehen. Jedoch gebraucht Schulz die Begriffe synonym: Er bezeichnet Lehrinhalte als Themen, Lehrabsichten als Intentionen, Lehrverfahren als Methoden und die Lehrmittel als Medien (vgl. z. B. Schulz 1964, S. 333).

tert den Begriff dieses Vorgehens zur *didaktischen Strukturanalyse* (vgl. Heimann 1962, S. 422). An dieser Stelle handelt es sich nicht mehr nur um die reine *Struktur* von Unterricht, sondern geht es vielmehr um dessen *Strukturierung*. Im Folgenden liegt der Fokus auf den vier strukturierbaren Elementen des Entscheidungsfeldes (vgl. Heimann 1962, S. 415ff.):

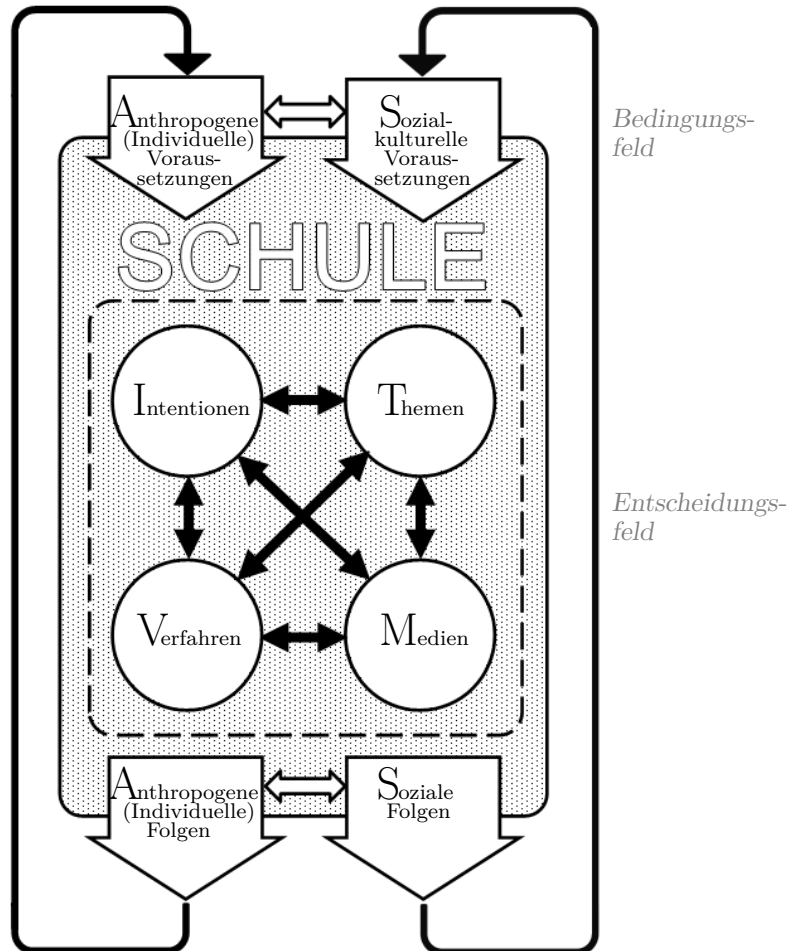


Abbildung 2.2: Berliner Modell.⁶

Intentionen können „im Sinne von Zwecksetzung[en] und Sinngebung unterrichtlicher Akte“ (Heimann 1962, S. 416) verstanden werden. Dabei können die Lern-Intentionen folgendermaßen systematisiert werden: Bei der Aneignung von Erkenntnissen, Kenntnissen und Überzeugungen ist von *kognitiv-aktiven* Intentionen die Rede, werden Anmutungen, Gesinnungen und Erlebnisse thematisiert, handelt es sich um *affektiv-pathische* Intentionen und bei der Absicht, Fähigkeiten und Fertigkeiten zu vermitteln, treten *pragmatisch-*

⁶ Abbildung aus Schulz 1969, S. 63.

dynamische Intentionen in den Vordergrund. In diesem Zusammenhang macht Heimann darauf aufmerksam, dass die einzelnen Intentionen in Wechselwirkung zueinander stehen und sich somit gegenseitig beeinflussen.

Themen beziehungsweise Inhalte sind meist in Zusammenhang mit dem jeweiligen Fach zu sehen und stehen somit entweder in einem fachwissenschaftlichen Zusammenhang oder sie repräsentieren verschiedene (auf den Inhalt bezogene) Techniken⁷. In Zusammenhang mit den im Unterricht zu vermittelnden Inhalten macht Heimann besonders darauf aufmerksam, dass jedes Thema ein *Lernpotential* beinhaltet und erst in Wechselwirkung mit den Intentionen, den Methoden und den Medien zu einem Lerninhalt wird.⁸ Äquivalent hierzu sind die Ausführungen von Wolfgang Klafki (1958) zum Zusammenhang von fachwissenschaftlichen Inhalten und Bildungsinhalten zu nennen. Heimann als Vertreter der Lerntheoretischen Didaktik, die das Lernen als Leitbegriff sieht, spricht von Lernpotentialen, die einen fachlichen Inhalt zu einem Lerninhalt expedieren (vgl. Heimann 1962, S. 419f.). Klafki als Vertreter der Bildungstheoretischen Didaktik, die den Bildungsbegriff im Zentrum positioniert, spricht von Bildungsgehalten, die aus fachlichen Inhalten Bildungsinhalte machen (vgl. Klafki 1958, S. 453f.). Auch wenn die Theorien unterschiedliche Leitbegriffe besitzen, verfolgen beide Vertreter schlussendlich das Ziel, den fachwissenschaftlichen Inhalt im Hinblick auf die in ihm vorhandenen Potentiale zu prüfen, um den Schülern die Zugänglichkeit zum Unterrichtsinhalt und damit das Lernen zu erleichtern und im weiteren Sinne zur Allgemeinbildung⁹ befähigen.

Verfahren oder methodische Strukturen des Unterrichts versteht Heimann als Lernhilfen, die in vielfältigen Formen auftreten: „die *Artikulation* des Unterrichts nach Stufen oder Phasen“ (Heimann 1962, S. 420); die Organisationsform in Bezug auf die Sitzordnung und

⁷ Heimann unterscheidet zwischen Techniken einerseits, die es generell im Unterricht zu erwerben gilt, wie Lesen, Schreiben und Rechnen und Techniken andererseits, die inhaltlich auf das Fach abgestimmt sind, wie z. B. das Experimentieren im Physikunterricht und das Schreiben eines zugehörigen Protokolls (vgl. Heimann 1962, S. 418).

⁸ Mit der angesprochenen Wechselwirkung zwischen den Elementen des Entscheidungsfeldes wird die durch Pfeile in Abbildung 2.2 angedeutete Interdependenz deutlich.

⁹ Klafki umreißt den Begriff der Allgemeinbildung durch die Selbstbestimmungs-, Mitbestimmungs- und Solidaritätsfähigkeit (vgl. z. B. Klafki 1986, S. 40).

die Sozialform (Gruppen- oder Einzelarbeit); die mit der Sozialform in Zusammenhang stehende Lehr- und Lernform (Lehrer- oder Schülervortrag) sowie das Zusammenspiel der Unterrichtsprinzipien (Motivierung, Differenzierung, Veranschaulichung usw.).

Medien repräsentieren den Unterrichtsinhalt. Beispielsweise lassen sich hier Bücher, Bilder, Filme, Diagramme, Naturgegenstände oder Modelle anführen. An dieser Stelle wird die Interdependenz zwischen den einzelnen Strukturmomenten wiederholt deutlich, da die Medien immer „einen [...] starken *Inhalts-* wie *Methodenbezug*“ (Heimann 1962, S. 421) aufweisen.

Die Strukturen des Entscheidungsfeldes „stellen so etwas wie eine *Matrix für unterrichtliche Handlungsmöglichkeiten* dar, die sich im Rahmen einer begrenzten Zahl von vorgegebenen Strukturen halten müssen, wenn sie anstreben, Unterricht genannt zu werden“ (Heimann 1962, S. 422). Das bedeutet, dass das Entscheidungsfeld einerseits schulorganisatorisch beeinflusst wird und andererseits von den anthropologisch-psychischen und situativ-sozial-kulturellen Bedingungen abhängig ist, die das *Bedingungsfeld* innerhalb der Struktur-Analyse und damit den zweiten Schritt innerhalb dieser bilden. Hierzu zählen mindestens vier Faktoren: „[die] ‚*Individuallage*‘ des Schülers (häusliches Milieu), [die] *Klassensituation* (mit ihrem Klassenklima), [die] *Schulsituation* (einzelner Schulzweige gymnasialen oder technisch-praktischen Charakters), schließlich [die] ‚*Zeit*‘-Situation, unter der hier die ganze Komplexion der gesellschaftlichen und kulturellen Faktoren, die sich zu einer bestimmten ‚*Zeitsignatur*‘ integrieren, verstanden werden sollen“ (ebd.). Wird dieser Zusammenhang auf das in Abbildung 2.1 dargestellte Didaktische Dreieck bezogen, so lassen sich die Faktoren des Bedingungsfeldes den inneren und äußeren Einflussfaktoren zuordnen. Wie sich den letzten Sätzen entnehmen lässt, handelt es sich hier weniger um Unterrichtsstrukturen, sondern vielmehr um die Unterrichtsstruktur bedingende Faktoren. Heimann sieht das Bedingungsfeld zwar oberflächlich als Struktur des Unterrichts an, da sich die genannten Faktoren auf die am Unterricht teilnehmenden Personen und gesellschaftliche Zusammenhänge beziehen, jedoch bezeichnet er die konkrete Analyse dieser Faktoren dementsprechend als *Faktoren-Analyse*. Von dieser ausgehend werden didaktische Entscheidungen hinsichtlich der Intentionen, Themen, Verfahren und Medien getroffen, wodurch die Faktoren-

Analyse „für die tatsächliche Verlaufsform realer Unterrichtsvorgänge“ (ebd.) entscheidend ist. (Vgl. Heimann, 1962, S. 422)

Bildungstheoretische und Kritisch-konstruktive Didaktik nach Wolfgang Klafki

Das Berliner Modell beziehungsweise die Lerntheoretische Didaktik ist aus der Unterrichtsanalyse entstanden und versucht von dieser ausgehend auf Aspekte der Unterrichtsplanung zu schließen. Dieser praktisch orientierte Ansatz steht dem hier bereits angesprochenen bildungstheoretischen (und kritisch-konstruktiven) Ansatz Klafkis, zumindest aus Sicht des Ausgangspunktes, entgegen. Klafki sieht die ‚Didaktische Analyse als Kern der Unterrichtsvorbereitung‘ (1958) und führt diese in dem gleichnamigen Beitrag differenziert aus. 1980 erweitert er die didaktische Analyse zum (*vorläufigen*) *Perspektivenschema* und stellt damit die ‚Unterrichtsplanung im Sinne kritisch-konstruktiver Didaktik‘ dar. Innerhalb der Bildungstheoretischen Didaktik formuliert Klafki als entscheidenden Schritt zur Unterrichtsplanung die „Erkenntnis vom *Primat der Didaktik i. e. S. im Verhältnis zur Methodik*“ (Klafki 1963, S. 86), was als praktische Konsequenz bedeutet, dass Entscheidungen hinsichtlich der Ziele und Inhalte vor methodischen Überlegungen getroffen werden sollen (vgl. Klafki 1985, S. 88). Mit der Weiterentwicklung seiner Bildungstheorie zur kritisch-konstruktiven Didaktik formuliert er den „*Primat der Zielentscheidungen im Verhältnis zu allen anderen, den Unterricht konstituierenden Faktoren zum Inhalt*“ (Klafki 1980, S. 259). Klafki verdeutlicht dies folgendermaßen:

Sowohl die Entscheidungen darüber, *was* jeweils und in welcher Perspektive etwas Gegenstand, Thema des Unterrichts sein soll oder besser: was sich im Prozess des Unterrichts als perspektivisch erörterte Thematik aufbaut, als auch Entscheidungen über Methoden und Medien des Unterrichts, weiterhin die Beurteilung und Bedeutung der jeweiligen soziokulturell vermittelten „anthropogenen“ sowie der institutionellen Bedingungen für Unterricht sind nur von den Zielsetzungen des Unterrichts her begründet möglich. (ebd.)

Die Unterricht planende Lehrkraft trifft nach Klafki zwar Entscheidungen hinsichtlich der Strukturmomente, die ebenso von Heimann innerhalb der

Lerntheoretischen Didaktik formuliert werden, jedoch weist er explizit darauf hin, dass diese nur in Abhängigkeit von den jeweiligen Zielentscheidungen getroffen werden können. Auf die Zielentscheidungen folgend sollte die konkrete Unterrichtsplanung nach Klafki in Form des Perspektivenschemas erfolgen:

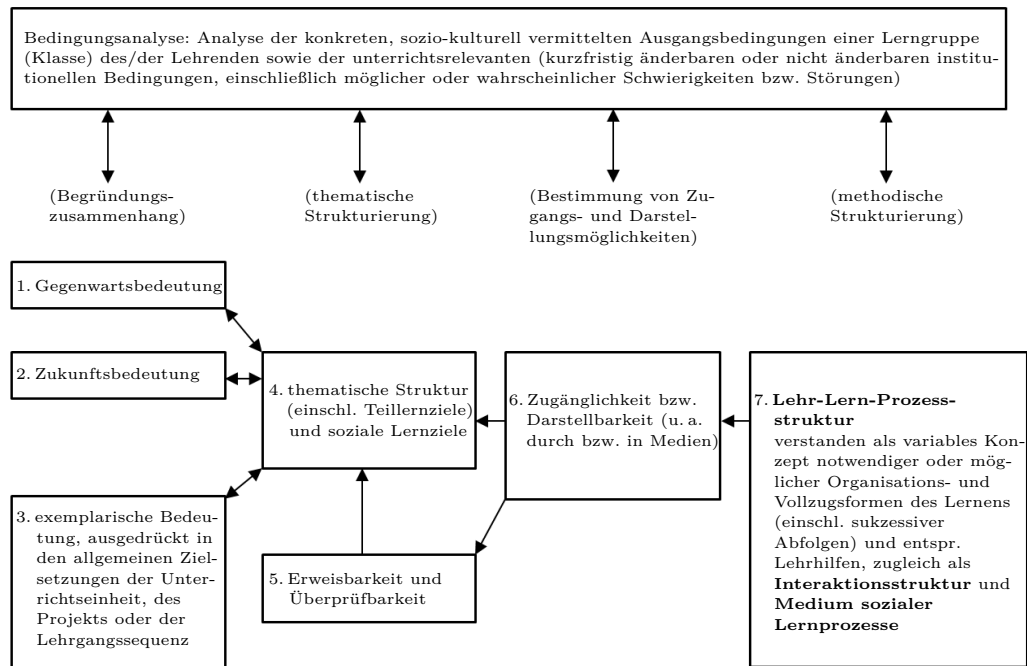


Abbildung 2.3: (Vorläufiges) Perspektivenschema zur Unterrichtsplanung.¹⁰

Die Bedingungsanalyse kann äquivalent zu der Faktoren-Analyse im Heimannschen Sinne gesehen werden. Klafki bringt die einzelnen Elemente seiner Unterrichtsplanung durch Nummerierung dieser in eine konkrete Reihenfolge und er betont, dass sich die Beziehung der einzelnen Perspektiven zueinander durch die Pfeile widerspiegeln, „die sich sprachlich in folgender Form ausdrücken lassen: Frage X muss primär im Hinblick auf Frage Y (auf die der Pfeil weist) beantwortet werden“ (Klafki 1980, S. 270). Bei genauerer Betrachtung der Pfeile, wird deutlich, dass alle auf den vierten Punkt, die *thematische Struktur* ausgerichtet sind, welche damit im Zentrum des Perspektivenschemas steht und durch Teillernziele und soziale Ziele ausgedrückt werden kann. Klafki vertritt die Ansicht, dass die Inhalte, die in den Bildungsstandards und Kerncurricula fixiert sind, nicht schlicht übernommen werden sollen. Vielmehr ist es die Aufgabe einer jeden Lehrkraft, das Thema hinsichtlich der entsprechenden *Gegenwarts-, Zukunfts- und exemplarischen Bedeutung* zu

¹⁰ Abbildung aus Klafki 1980, S. 272.

überprüfen und so den *Begründungszusammenhang* zu klären. Für die konkrete Unterrichtsplanung bedeutet dies, das derzeitige und vermutlich zukünftige alltägliche (und berufliche) Leben der Schüler mit den jeweiligen individuellen Interessen und Sorgen zu berücksichtigen und damit die Bedeutung des Unterrichtsinhaltes für die Gegenwart und Zukunft aufzudecken. Mit Betrachtung der exemplarischen Bedeutung muss die Lehrkraft im Hinblick auf die gesteckten Zielsetzungen der Unterrichtseinheit prüfen, welche allgemeineren Zusammenhänge sich aus dem behandelten Unterrichtsinhalt erschließen lassen. Diese ersten drei Hauptfragen, die Klafki zusammengefasst als *ersten Fragenkomplex* bezeichnet, sind durch Doppelpfeile mit der thematischen Struktur verbunden, was auf einen wechselseitigen Einfluss dieser Elemente aufeinander schließen lässt. Wichtig in diesem Zusammenhang ist die Bedingungsanalyse, die sich – wie durch die Pfeile erkennbar – auf alle Grundfragen des Perspektivenschemas bezieht. Hinsichtlich des ersten Fragenkomplexes muss geklärt werden, welche individuellen Voraussetzungen – bezogen auf das Alltagsleben, die persönlichen Interessen und Vorkenntnisse – bei den Lernenden herrschen. (Vgl. Klafki 1980, S. 272ff.)

Die vierte und fünfte Hauptfrage fasst Klafki als *zweiten Fragenkomplex* zusammen und bezeichnet diesen als *thematische Strukturierung*. Die im Zentrum stehende thematische Struktur ist von allen anderen Perspektiven des Schemas abhängig. Die Strukturierung eines Themas kann beispielsweise so ausgerichtet sein, dass sie sich an dem Alltagsleben der Schüler (Gegenwartsbedeutung) orientiert. Oder ein Unterrichtsinhalt wird hinsichtlich der vorhandenen Medien (sechste Hauptfrage) strukturiert, die wiederum abhängig sind von den unterrichtlichen Methoden (siebte Hauptfrage). Klafki weist besonders darauf hin, dass der Lernprozess hinsichtlich der thematischen Struktur evaluiert werden muss und spricht damit die fünfte Hauptfrage zur *Erweisbarkeit und Überprüfbarkeit* an. (Vgl. Klafki 1980, S. 279ff.) In diesem Zusammenhang wendet er sich besonders gegen einen „vorwiegend ‚ergebnisorientiert[en]‘ und ‚produktorientiert[en]‘“ (Klafki 1991, S. 76) Leistungsbegriff, der Benotungen von Abschlussprüfungen impliziert. Stattdessen sollten „zwischenzeitliche Rückmeldung[en] an [die] [...] Lernenden stattfinden“ (ebd.), die zur Unterstützung während des Lernprozesses beitragen und gleichzeitig die Selbständigkeit, -beurteilung und -steuerung der Schüler fördert (vgl. Klafki 1991, S. 76f.). Auch in Bezug auf den zweiten Fragenkomplex spielt

die Bedingungsanalyse eine wichtige Rolle, da die thematische Struktur vom Vorwissen der Lernenden abhängig ist und ein Lernzuwachs erst dann evaluiert werden kann, wenn die Ausgangslage bekannt ist. (Vgl. Klafki 1980, S. 279ff.)

Besonders im Hinblick auf die bereits angesprochene sechste Hauptfrage, die sich auf die *Zugänglichkeit bzw. Darstellbarkeit* bezieht, müssen die sozio-kulturellen Ausgangsbedingungen der Lerngruppe sowie die institutionellen Bedingungen betrachtet werden. Beispielsweise muss ein für den Einstieg in die Unterrichtsstunde verwendetes Medium zur Lerngruppe passen und für die Schüler greifbar sein. Die siebte und abschließende Hauptfrage bezieht sich auf die *Lehr-Lern-Prozess-Struktur* und kann nur in Bezug auf die vorangegangenen Hauptfragen beantwortet werden. Sie fragt nach der *methodischen Strukturierung* und Klafki betont in diesem Zusammenhang, dass Unterrichtsmethoden nicht nur als Instrumente des Unterrichts verstanden werden dürfen, vielmehr müssen sie als Mittel betrachtet werden, mit „denen einerseits unterrichtliche Lehrprozesse, andererseits Lernprozesse wechselseitig aufeinander bezogen werden“ (Klafki 1980, S. 262). Demnach soll sich die Unterrichtsmethodik „Organisations- und Vollzugsformen des Lehrens [widmen, die] adäquates Lernen ermöglichen“ (Klafki 1980, S. 263). Außerdem wird in Zusammenhang mit dieser Hauptfrage nach den „*Interaktionsformen* [gefragt], in denen sich die Abfolge des Lehr-Lern-Prozesses vollziehen kann“ (Klafki 1980, S. 283).

Wird das Perspektivenschema zur Unterrichtsplanung nach Klafki mit dem Berliner Modell nach Heimann verglichen, wird deutlich, dass beide dieselben Strukturen und Faktoren unterrichtlichen Geschehens beschreiben. Die verschiedenen Ansätze und Herangehensweisen bilden dabei den wohl größten Unterschied: Während Heimann die Strukturen unterrichtlichen Handelns durch die Analyse dieser aufdeckt und ausgehend von diesen auf die Planung von Unterricht schließt, beschreibt Klafki die Perspektiven der Unterrichtsplanung vom theoretischen Standpunkt aus. Abschließend lassen sich noch einmal die Strukturen festhalten, die sich in jedem unterrichtlichen Handeln finden, im Vorfeld planen und im Anschluss reflektieren lassen: In jeder Unterrichtsstunde werden zu einer festgesetzten *Absicht* – die durch *Ziele* formuliert wird – *Inhalte* – denen eine *thematische Struktur* zugrunde liegt – durch einen *strukturierten Lehr-Lern-Prozess* – oder auch durch *unterrichtliche Methoden* – vermittelt. Dabei werden die Unterrichtsinhalte durch *Medien* repräsentiert. In

dieser Konstellation bringen die Schüler und die Lehrkraft *individuelle Vorkenntnisse und Vorlieben* mit in den Unterricht.

2.1.3 Instructional Design

Das Instructional Design beziehungsweise das Instruktionsdesign wird im Deutschen auch mit Didaktischem Design übersetzt und hat sich Ende der 1950er Jahre insbesondere in Nordamerika als eine Teildisziplin der empirischen Lehr-Lernforschung etabliert. Der Gegenstandsbereich des Instructional Design bezieht sich auf die Gestaltung und Evaluation von Lernmaterialien in Abhängigkeit von zuvor gesteckten Zielen. Der Begriff Instruktion bezieht sich auf die planmäßige und kompetenzfördernde Anordnung von Lernumgebungen, womit dieser Begriff weitreichender ist als die Begriffe Unterricht und Lehre. Der Begriff Design wird häufig mit einer künstlerischen Tätigkeit gleichgesetzt, da in die Gestaltung einer Lernumgebung ein gewisses Maß an Kreativität und Einfallsreichtum einfließt. Als Urheber der Idee des Instructional Design gilt Robert M. Gagné. Das Instruktionsdesign wird als eine Planungswissenschaft verstanden. (Vgl. Seel 1999, S. 2f., S. 5; Niegemann, Domagk, Hessel, Hein, Hupfer & Zobel 2008, S. 1) Doch obwohl dieses erste Verständnis des Instructional Design durchscheinen lässt, dass es sich auch hier um eine Wissenschaft vom Lehren und Lernen handelt, lässt sich das Instructional Design nicht ohne Weiteres mit der Allgemeinen Didaktik gleichsetzen. Ein erster Unterschied zeigt sich beispielsweise in dem Ursprung des Instructional Design, welcher in der militärischen Ausbildung während des zweiten Weltkriegs zu finden ist. (Vgl. Zierer 2010, S. 34) Darüber hinaus unterscheidet sich das Instruktionsdesign in weiteren Punkten von der Allgemeinen Didaktik (vgl. Seel 1999, S. 3f.):

Theoretische Fundierung: Während sich die Modelle der Allgemeinen Didaktik (bildungstheoretisch/ kritisch-konstruktiv und lerntheoretisch) mit den zu planenden Strukturen von Unterricht beschäftigen, liegt der Fokus in dem Instructional Design auf lern- und kognitionspsychologischen Erkenntnissen. Dabei geht es vorrangig um die lernförderliche „Planung und Gestaltung effektiver Lernumgebungen und -materialien“ (Seel 1999, S. 3). Innerhalb der Allgemeinen Didaktik rücken lern- und kognitionspsychologische Theorien eher in den Hintergrund.

Empirische Fundierung: Innerhalb des Instructional Design werden die lern- und kognitionspsychologischen Fundierungen und deren Effektivität in den gestalteten Lernumgebungen empirisch überprüft. In der Allgemeinen Didaktik dagegen rücken insbesondere die didaktischen Modelle selten in den Fokus empirischer Forschung.

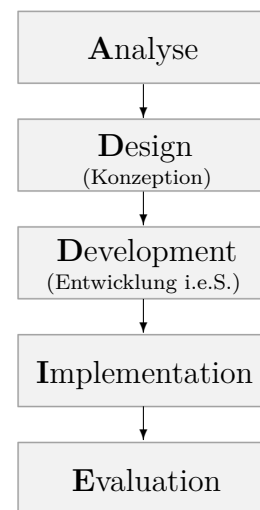
Technologische Begründung: Während sich das Instructional Design mit den modernen Technologien beschäftigt und so beispielsweise Planungen zu Lernsoftwares durchführt, rücken die aktuellen Informations- und Kommunikationstechnologien innerhalb der Allgemeinen Didaktik eher in den Hintergrund. Jedoch darf dabei nicht vergessen werden, dass Medien generell als Vermittler zwischen den Schülern, der Lehrkraft und dem Unterrichtsgegenstand in der Allgemeinen Didaktik eine große Rolle spielen.

Entwicklung: Das Instructional Design entwickelte sich besonders in Nordamerika innerhalb der Lehr-Lernforschung als eine Teildisziplin. In dieser Disziplin liegt der Fokus auf der Gestaltung von Lernmaterialien, sodass diese mittels der Ergebnisse fortwährend weiterentwickelt wird. Innerhalb der Allgemeinen Didaktik entwickeln sich parallel vielzählige Didaktiken, dennoch liegt der Fokus auf der weiteren Spezifizierung der beiden großen Didaktiken (bildungstheoretisch/ kritisch-konstruktiv und lerntheoretisch).

In den Überlegungen der Allgemeindidaktischen Modelle stehen der Unterricht und dessen Planung im Vordergrund. Das Instructional Design versteht sich ebenfalls als Planungswissenschaft. Jedoch sind die Planungen nicht an das Schulsystem gebunden, sondern finden zudem im außerschulischen Bereich statt. Dabei handelt es sich entweder um eine *Globalplanung*, die sich beispielsweise mit der Weiterbildung eines gesamten Unternehmens beschäftigt, oder um eine *Detailplanung*, bei der die Planung von Einzelaspekten eines Lehr-Lernprozesses im Vordergrund steht. Für das Instructional Design ist dabei nicht nur der Prozess, sondern auch das Produkt der Planung von Interesse. Der Planungsprozess beschäftigt sich dementsprechend mit der Gestaltung von Lernumgebungen unter Berücksichtigung individueller Bedingungen, die sich auf das Lernen auswirken, während das Planungsprodukt die schlussendlich gestaltete Lernumgebung darstellt. Innerhalb der Planung muss eine gewisse Flexibilität berücksichtigt werden, sodass die Handlungsmöglichkeiten

kurzfristig veränderbar sind. Das Instructional Design beschäftigt sich jedoch nicht nur mit der Planung der Gestaltung einer Lernumgebung, sondern es geht besonders bei einer flexiblen Planung auch um deren Implementation sowie Evaluation, um die Wirksamkeit der Lernumgebung überprüfen zu können. (Vgl. Seel 1999, S. 4f.) In diesem Zusammenhang ist das Instructional System Design-Modell **ADDIE** zu nennen, welches als übergeordneter Leitfaden für das Instructional Design anzusehen ist (vgl. Niegemann et al. 2008, S. 20; Zierer & Seel 2012, S. 9f.; Zierer 2010, S. 36):

Der erste Schritt ist die *Analyse* der Ausgangslage. Es gilt zu klären, welche Rahmenbedingungen für die zu konzipierende Lernumgebung von Bedeutung sind. Infolgedessen werden auch die Lernvoraussetzungen analysiert, die seitens der Lernenden bestehen. Diese Analyse erfolgt immer hinsichtlich eines bestimmten Inhalts, der durch die Lernumgebung vermittelt werden soll. Der zweite Schritt befasst sich mit dem *Design*, also mit der *Konzeption* der Lernumgebung. Abgeleitet aus der Analyse der Ausgangslage werden hier die Lernziele der Lernumgebung festgelegt. Zudem werden Überlegungen angestellt, wie und wodurch, also mit welchen Methoden und Medien, diese Lernziele erreicht werden können. Im dritten Schritt wird der Fokus auf das *Development* und damit auf die *Entwicklung* der Lernumgebung gelegt. Damit ist die konkrete Entwicklung der Lernmaterialien gemeint, die die zuvor festgelegten Lernziele aufgreifen und die Methoden spezialisieren. Aus diesem Grund wird dieser Schritt als *Entwicklung im engeren Sinne* bezeichnet, um im nächsten Schritt, der *Implementation*, die geplante Lernumgebung in der Praxis umzusetzen. Der fünfte und letzte Schritt bezieht sich auf die *Evaluation* der geplanten und durchgeführten Lernumgebung. Die Evaluation kann sich dabei entweder auf die Implementation und damit die Umsetzung der Lernumgebung oder auf die Qualität und damit auf das Ergebnis beziehungsweise den Output der Lernumgebung beziehen.

Abbildung 2.4: ADDIE.¹¹

¹¹ Abbildung aus Niegemann et al. 2008, S. 20.

Abschließend lässt sich festhalten, dass sich das Instructional Design zwar im Hinblick auf den Ursprung, der theoretischen und empirischen Fundierung, der technologischen Begründung und der Entwicklung von der Allgemeinen Didaktik unterscheidet, es jedoch auch Gemeinsamkeiten gibt, die sich in den unterrichtlichen Ziel-, Inhalts- und Prozessfragen wiederfinden (vgl. Zierer 2010, S. 36f.). Aus diesem Grund bezeichnet Zierer das Instructional Design „als englische Entsprechung für den deutschen Begriff ‚Didaktik‘“ (Zierer 2010, S. 37).

2.2 Didaktische Entwicklungsforschung

Die Didaktische Entwicklungsforschung wird als Teil der Unterrichtsentwicklung angesehen, die wiederum mit der Schulentwicklung verwoben ist. Unterrichtsentwicklung lässt sich durch entsprechende empirische Forschung über die Veränderung von Unterrichtsqualität ermitteln. Die Unterrichtsentwicklung arbeitet dabei jedoch nicht immer mit der Unterrichtsqualitätsforschung zusammen. Vielmehr werden die Ergebnisse der traditionellen Lehr-Lernforschung für eine praktische Unterrichtsentwicklung in Frage gestellt. Wolfgang Einsiedler vertritt allerdings die Position, „dass Unterrichtsentwicklung eng mit Unterrichtsforschung und empirischer fachdidaktischer Forschung zu verbinden ist“ (2011, S. 42). So kann es nicht Ziel von Unterrichtsforschung sein, die bestehenden Reformen innerhalb von Schule und Unterricht zu bestätigen. Vielmehr sollten durch die Ergebnisse aus den universitären empirischen Forschungen konkrete Schlüsse zur Verbesserungen der Unterrichtsentwicklung gezogen werden. Die Didaktische Entwicklungsforschung greift diese Problematik auf und versucht den Standards und Erwartungen sowohl der universitären Forschung als auch der Unterrichtspraxis gerecht zu werden und diese miteinander zu verbinden. Es geht dabei also um eine gezielt praxisnahe Forschung, die sowohl von Forschern als auch von Lehrkräften gestaltet werden kann. Ziel der Didaktischen Entwicklungsforschung ist es, „Materialien und Handlungsempfehlungen zur Unterrichtsverbesserung [zu] entwickeln“ (ebd.). Es gilt demnach, die Ergebnisse aus der Lehr-Lernforschung in die Praxis zu transferieren, um die beiden getrennt voneinander arbeitenden Felder der universitären Unterrichtsforschung und der Schule beziehungsweise des Unterrichts zu vereinen. (Vgl. Einsiedler 2011, S. 41f.)

2.2.1 Problematik

In den Ansätzen der Bildungstheoretischen beziehungsweise Kritisch-konstruktiven Didaktik nach Klafki und der Lerntheoretischen Didaktik nach Heimann entstehen praxisnahe Modelle zur Unterrichtsplanung.¹² Dies entspricht dem traditionellen Selbstverständnis der Allgemeinen Didaktik und der Schulpädagogik. Die modernen Ansätze der universitären didaktischen Forschung zeichnen sich vermehrt durch stark methodisierte empirische Bildungsforschung aus. (Vgl. Einsiedler 2011, S. 42f.) Die Ergebnisse aus der Bildungsforschung sind von den Lehrkräften wenig nutzbar, sondern nützen vielmehr der Bildungspolitik und -verwaltung, da sich dadurch Steuerungsprozesse legitimieren und optimieren lassen (vgl. Kahlert & Zierer 2011, S. 72). Wenn die Ergebnisse aus der empirischen Bildungsforschung auf die Unterrichtspraxis übertragen werden sollen, kann dies kaum an die Lehrkräfte abgeschoben werden, denn „[k]eine Lehrkraft ist in der Lage, sich sämtliche Ideen und Arbeitsmaterialien für den Unterricht in unterschiedlichen Jahrgangsstufen nach Maßgabe neuer inhaltlicher und lernrelevanter Erkenntnisse zu erarbeiten“ (Kahlert & Zierer 2011, S. 74). Im Hinblick auf die Unterrichtspraxis entstehen dagegen zahlreiche Handlungsempfehlungen für Lehrkräfte, aber auch für Schüler in Form von Handbüchern zu Methoden und Materialien ohne jeglichen Forschungsbezug. Einsiedler spricht hier von zwei Referenzsystemen, zwischen denen sich die didaktische Forschung bewegt. (Vgl. Einsiedler 2011, S. 42ff.) Während innerhalb erziehungswissenschaftlicher Forschung der Fokus auf die einzelnen zu untersuchenden Komponenten gelegt wird, seien es beispielsweise die Vorstellungen zu oder das Interesse an bestimmten Themenbereichen seitens der Schüler, bedienen sich Lehrkräfte an bestehenden Methodenhandbüchern und Unterrichtsmaterialien, da sie ihre Zeit vermehrt den alltäglichen Aufgaben widmen müssen. Die Auswahl dieser Materialien durch die Lehrkräfte erfolgt nicht immer reflektiert. Zudem weisen die Materialien kaum erziehungswissenschaftlichen Theorie- und Forschungsbezug auf, sodass eine unzählige Menge an Handbüchern und Praxismaterialien entsteht, die nicht die gewünschten Effekte erzielen können. (Vgl. Kahlert & Zierer 2011, S. 76)

¹² Diese Ansätze sind nur als Beispiele zu verstehen. Innerhalb der Allgemeinen Didaktik gibt es zahlreiche Ansätze, die sich mit der Planung von Unterricht beschäftigen.

Didaktische Entwicklungsforschung darf nicht verstanden werden als eine Mischform aus beiden Forschungsfeldern, vielmehr positioniert sie sich als universitäre Forschung, aus der praxisrelevante Schlüsse gezogen werden. Die Ergebnisse sollen auf die Unterrichtspraxis transferierbar sein. Die Positionierung didaktischer Entwicklungsforschung als universitäre Bildungsforschung ist von zentraler Bedeutung, da sie den wissenschaftlichen Bezug bei einem zu oberflächlichen theoretischen Hintergrund oder einem mangelnden methodischen Vorgehen verlieren würde. Die Didaktische Entwicklungsforschung bedient sich oftmals einer Kombination aus quantitativen und qualitativen Methoden, da sie andere Ziele verfolgt als die stringente Theorieforschung. (Vgl. Einsiedler 2011, S. 48)

Sowohl die traditionelle Lehr-Lernforschung als auch praxisnahe neue Ansätze können hinsichtlich verschiedener Problematiken kritisiert werden (vgl. Einsiedler 2011, S. 48ff.):

Die Relevanzproblematik meint das schwer idealisierbare Forschungsumfeld innerhalb der Unterrichtsforschung. Im Unterricht sind Störvariablen nur schwer kontrollierbar und Gruppendynamiken unter den Schülern sind ebenfalls kaum feststellbar. Die interne Validität wird durch die Störvariablen und die Gruppendynamiken immens beeinflusst, mit anderen Worten: Es kann nicht immer das gemessen werden, was gemessen werden soll. Innerhalb der Didaktischen Entwicklungsforschung genügen quantitative Methoden nicht, da der internen Validität keine vergleichbare Bedeutung wie in der Laborforschung zugeschrieben werden kann. Die quantitativen Methoden müssen mit qualitativen ergänzt werden, um die objektiven Daten mit der subjektiven Komponente abzugleichen.

Die Technologieproblematik bezieht sich auf die theoretischen Hintergrundüberlegungen und deren tatsächliche praktische Überprüfbarkeit. Zumeist sind die Theorien an die verfügbaren Technologien anzupassen.

Die Kausalitätsproblematik bezieht sich auf den Vorwurf mangelnder Kausalität durch fehlende vorhersehbare Verhaltensannahmen innerhalb der Unterrichtsforschung. In der bildungswissenschaftlichen Lehr-Lernforschung können keine kausalen Handlungsschritte festgelegt oder erforscht werden, da es sich eher um subjektive Beweggründe für Handlungen handelt.

2.2.2 Verortung

Wie bereits erwähnt, ist Didaktische Entwicklungsforschung nicht als reine Grundlagen- oder als reine Anwendungsforschung zu verstehen. Vielmehr ist sie als *Forschung und Entwicklung* zu verorten, die „theoretisch-erklärende Forschungsanteile mit Gestaltungsaufgaben für die praktische Nutzung [verbindet]“ (Einsiedler 2011, S.53). So sollen einerseits – im Sinne der Grundlagenforschung – Handlungen und deren Resultate erforscht werden, sodass typische Reaktionen aus festgelegten Handlungen abgeleitet werden können und andererseits sollen aus den Handlungs-Reaktions-Zusammenhängen Anweisungen und Empfehlungen für die Unterrichtspraxis entstehen. Für die Forschung und Entwicklung erweist sich die Technologieproblematik als vorteilhaft, da sie sich dadurch stärker an der praktischen Umsetzung orientieren muss. Da sowohl Aspekte der Grundlagen- als auch der Anwendungsforschung berücksichtigt werden müssen, erfolgt die Ausrichtung der Didaktischen Entwicklungsforschung stärker an den Problemen der Praktiker. Dabei können folgende Brücken zwischen der Grundlagen- und der Anwendungsforschung geschlagen werden:

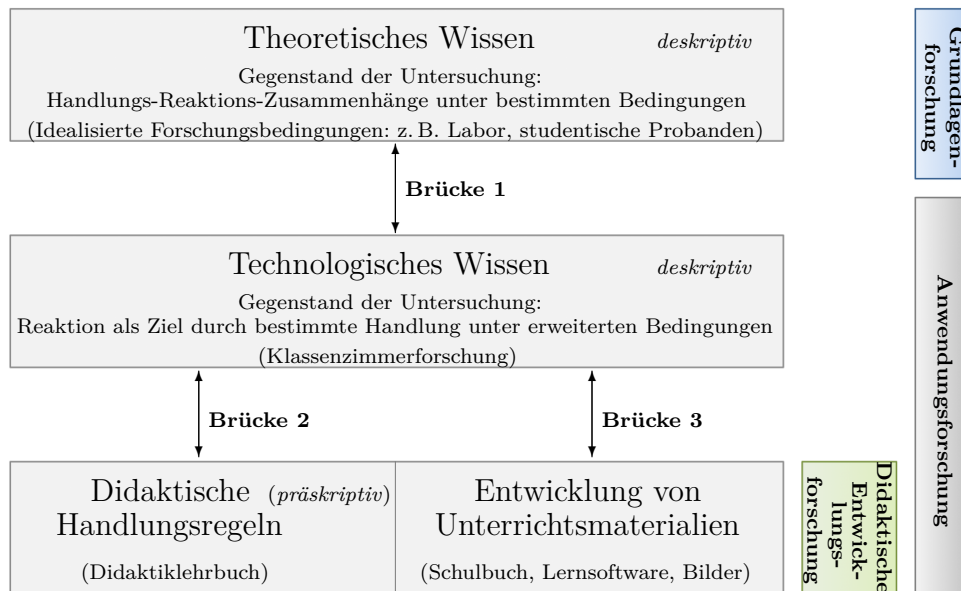


Abbildung 2.5: Modell zum Zusammenhang von Grundlagen-, Anwendungs- und Didaktischer Entwicklungsforschung.¹³

Brücke 1 beschreibt die Beziehung zwischen dem theoretischen und dem technologischen Wissen. Innerhalb der Grundlagenforschung wer-

¹³ Abbildung modifiziert aus Einsiedler 2011, S. 55.

den Zusammenhänge zwischen Handlungen und Reaktionen unter festgelegten Bedingungen untersucht. Die Untersuchung findet unter idealisierten Forschungsbedingungen und losgelöst vom Schulkontext statt, sodass beispielsweise Gruppendynamiken innerhalb von Schülergruppen vernachlässigt werden können. Die Ergebnisse zeichnen sich durch die Beschreibung der Zusammenhänge aus und sind somit deskriptiv. Die Ergebnisse werden als Grundlage für die Forschung zum technologischen Wissen verwendet, um diese im schulischen Kontext zu überprüfen. Dabei wird die Reaktion als Ziel einer bestimmten Handlung festgelegt und unter erweiterten Bedingungen (im Vergleich zur Grundlagenforschung) untersucht. Es handelt sich dabei nicht mehr um idealisierte Forschungsbedingungen, sondern um reale Bedingungen durch eine Klassenzimmerforschung. Die Ergebnisse sind wieder rein deskriptiv, indem sie die Zusammenhänge zwischen den Handlungen und den Reaktionen unter Klassenzimmerbedingungen beschreiben. (Vgl. Einsiedler 2011, S. 54)

Brücke 2 bezieht sich auf den Transfer der deskriptiven Ergebnisse zu präskriptiven didaktischen Handlungsregeln. Der präskriptive Charakter ist dabei nicht als vorschreibend zu verstehen¹⁴, vielmehr handelt es sich um Empfehlungen für die Praxis auf Grundlage der theoretisch-technologischen Ergebnisse. In diesem Zusammenhang entstehen beispielsweise Didaktiklehrbücher, die sich an Lehrkräfte richten und Handlungsempfehlungen für bestimmte Situationen beinhalten, die das Verhalten und das Lernen der Schüler positiv beeinflussen sollen. (Vgl. Einsiedler 2011, S. 54f.)

Brücke 3 meint den Transfer der deskriptiven theoretisch-technologischen Ergebnisse auf die Entwicklung von Unterrichtsmaterialien. Dabei handelt es sich beispielsweise um die Entwicklung einer Lernsoftware, die erprobte Elemente enthält, wie Bild-Text-Kombinationen oder Animationen. (Vgl. ebd.)

Das Modell in Abbildung 2.5 könnte den Anschein erwecken, dass es sich innerhalb der Didaktischen Entwicklungsforschung um die reine Übernahme der Ergebnisse aus Grundlagen- und Anwendungsforschung handelt,

¹⁴ Aus diesem Grund ist der Begriff *präskriptiv* in Abbildung 2.5 in Klammern gesetzt.

um diese für den Unterrichtsalltag praktikabel zu machen. Jedoch zeichnen sich die Brücken 2 und 3 zusätzlich durch „Erfindungsgeist, Kreativität und didaktische[n] Einfallsreichtum“ (Einsiedler 2011, S. 55) aus. Es gilt die deskriptiven Ergebnisse mit kreativen Ideen zu verknüpfen. Dazu bietet es sich an, die Expertise von Praktikern zu nutzen und die dadurch entwickelten Materialien zu erproben. (Vgl. Einsiedler 2011, S. 55f.) Bei der Erprobung der Materialien sollte untersucht werden, wie gut die Umsetzung des theoretisch-technologischen Wissens ist. Dabei sind viele Faktoren nicht messbar, wie die Kreativität und der Einfallsreichtum der Unterrichtsmaterialgestalter.

2.2.3 Einordnung und Beschreibung des eigenen Vorhabens

Grundlagenforschung hat in der Bildungsforschung „ein höheres Ansehen als angewandte Forschung mit einem hohen Praxisbezug“ (Gräsel 2011, S. 88). Forschungen darüber, wie das aus der Grundlagenforschung gewonnene theoretische Wissen in die Praxis übertragen werden kann, gibt es eher selten (vgl. ebd.). Die Verknüpfung von Theorie und Forschung – und damit die Grundlagenforschung – wird hochschulorganisatorisch initiiert, während die Praxis schulorganisatorisch gebunden ist (vgl. Kirschhock & Munser-Kiefer 2011, S. 125) Die Praxisrelevanz ist dabei oftmals leitend für die Lehr-Lernforschung, jedoch erfolgt wenig Transfer der Ergebnisse in die Praxis. Wenn dennoch ein Transfer stattfindet, dann zumeist in Form von Top-down-Strategien. Dabei handelt es sich um Reformen, die extern initiiert und hierarchisch durchgesetzt werden. Als Beispiel dafür lässt sich die Neuerung von Lehrplänen und Curricula nennen. Die von oben vorgegebenen Reformen werden in der Praxis meist nicht wie ursprünglich gedacht verwirklicht, da die ausführenden Lehrkräfte die Neuerung nur oberflächlich realisieren. Da die Expertise der Lehrkräfte bei den Planungen nicht genutzt wird, kann es sogar zu Ablehnung seitens der Lehrpersonen kommen. (Vgl. Gräsel 2011, S. 88f.) Andererseits ist ein Einbezug von Lehrkräften in die Entwicklung von Reformen oder von Unterrichtsmaterialien sehr zeitaufwändig. Für die einbezogenen Lehrpersonen könnte dies einen Mehraufwand zu ihren alltäglichen Aufgaben bedeuten, was besonders von jungen Lehrkräften kaum zu leisten ist. Während sich an den Hochschulen deskriptive Ergebnisse von Grundlagenforschung häufen, wird von den Lehrkräften erwartet, diese Ergebnisse

bei der Planung und Durchführung ihres Unterrichts zu berücksichtigen. (Vgl. Kahlert & Zierer 2011, S. 74)

Innerhalb dieses Vorhabens sollen Lernmaterialien entwickelt und evaluiert werden, die sich an dem Theoretischen und dem Technologischen Wissen zur Konzeption von Lernmaterialien orientieren. Dabei wird das Ziel verfolgt, diese konzipierten Lernmaterialien zu erproben und auf Grundlage der Ergebnisse zu verbessern. Nur so können die Lernmaterialien in der Praxis hilfreich sein. Dementsprechend kann das Vorhaben folgendermaßen skizziert werden:

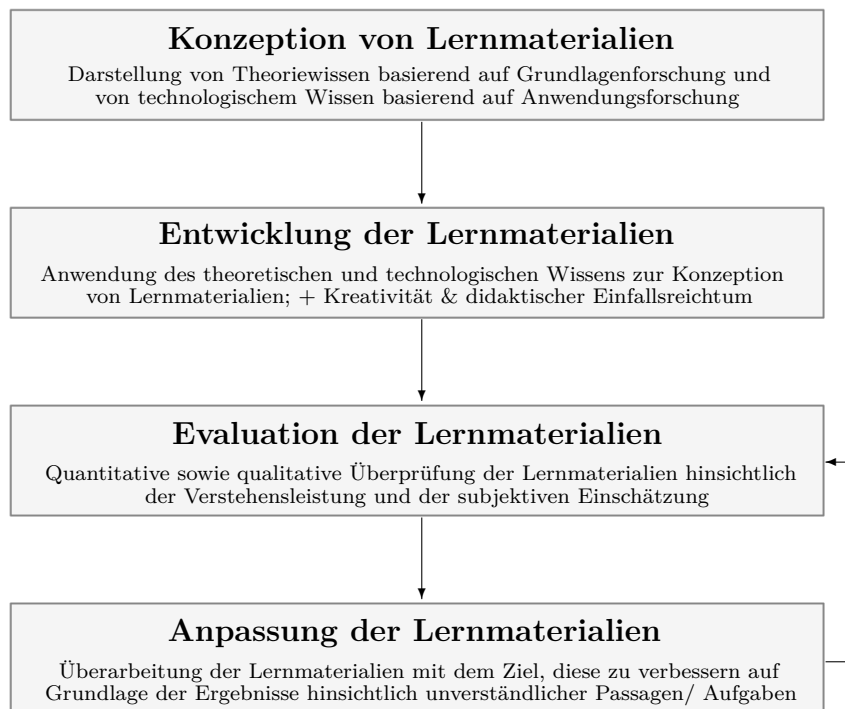


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung des eigenen Vorhabens.

Konzeption von Lernmaterialien: Für den Theorieteil wird der Fokus auf die Konzeption von Lernmaterialien gelegt. Dazu werden die in der Grundlagenforschung überprüften theoretischen Überlegungen und deren Ergebnisse zum Lernen in Abhängigkeit von der Gestaltung von Lernmaterialien dargestellt. Die Überlegungen lassen sich dem Instructional Design zuordnen, da sich diese mit der Gestaltung von Lernumgebungen aus kognitions- und lerntheoretischer Sicht auseinander setzt. Aus diesem Grund rückt besonders die *Cognitive Load Theorie* als ein Schwerpunkt in den Fokus. Dabei

handelt es sich um den derzeitigen Forschungsstand zur Konzeption von Lernmaterialien.

Entwicklung der Lernmaterialien: Die aus der Grundlagenforschung gewonnenen und im theoretischen Teil dargestellten Erkenntnisse werden für die Entwicklung der Lernmaterialien genutzt. Zudem wird das Thema curricular eingeordnet und sowohl (fach-)didaktisch als auch kognitionspsychologisch aufbereitet. Dabei spielen auch die Kreativität und ein gewisser Einfallsreichtum eine Rolle, die zwar schwer messbar sind, sich aber in der Gestaltung der Lernmaterialien widerspiegeln.

Evaluation der Lernmaterialien: Für die Evaluation der Lernmaterialien ist es wichtig, dass der Fokus nicht auf die Effektivität und Praktikabilität des theoretischen und technologischen Wissens gelegt wird. Diese wurden bereits innerhalb der Grundlagen- und Anwendungsforschung ausreichend getestet. Vielmehr sollte das Ziel der Evaluation sein, im Lernmaterial vorhandene Schwachstellen herauszufiltern und zu beseitigen. Somit wird das Hauptaugenmerk auf die Aufgaben beziehungsweise Passagen gelegt, die von den Probanden falsch gelöst und/ oder nicht verstanden werden. Um Gruppendynamikprozesse zu vermeiden, findet die Evaluation losgelöst vom Schulkontext in Form von Einzelerhebungen statt.

Anpassung der Lernmaterialien: Auf Grundlage der Ergebnisse aus der Evaluation der Lernmaterialien werden diejenigen Passagen überarbeitet, die von den Probanden als schwer verständlich eingestuft werden. Gleiches gilt für die Aufgaben, die falsch gelöst werden. Dabei spielen erneut Kreativität und didaktischer Einfallsreichtum eine Rolle.

Erneute Evaluation der Lernmaterialien: Nach der Anpassung der Lernmaterialien werden diese erneut evaluiert. Dadurch lässt sich einerseits eine Aussage darüber machen, ob es sich bei der Anpassung der Materialien um eine Verbesserung dieser handelt. Andererseits können die Lernmaterialien im Hinblick auf die gemachten Fehler und unverständliche Passagen wiederholt angepasst werden.

Nach jeder Anpassung der Lernmaterialien, werden diese auch erneut evaluiert, da nur so abgeschätzt werden kann, ob es sich bei der Anpassung

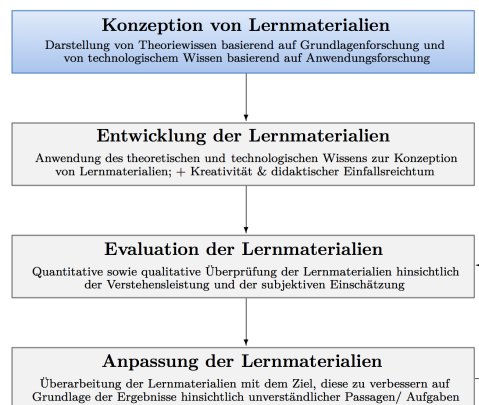
um eine Verbesserung handelt. Die Lernmaterialien werden so häufig angepasst und evaluiert, bis die Veränderungen nur noch minimal sind und selbst nach einer Verbesserung keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich auftretender Schwierigkeiten zwischen den Lernmaterialversionen vorhanden sind. Dieses Vorgehen lässt sich als eine Form der Didaktischen Entwicklungsforschung beschreiben, das aber auch Parallelen zum zuvor vorgestellten Instructional System Design-Modell ADDIE (siehe Abbildung 2.4 auf Seite 21) aufweist.

Kapitel 3

Konzeption von Lernmaterialien

Der erste Schritt innerhalb des skizzierten Vorhabens ist die Darstellung des theoretischen und technologischen Wissens zur Konzeption von Lernmaterialien, welches für die Entwicklung dieser im zweiten Schritt benötigt wird. Für die Konzeption von Lernmaterialien rücken besonders kognitionspsychologische Überlegungen in den Vordergrund, die sich mit der Lernförderlichkeit von Lernmaterialien auseinandersetzen. Diese lassen sich dem Instructional Design zuordnen. So nimmt die Cognitive Load Theorie einen zentralen Stellenwert ein, da sich diese mit der Belastbarkeit des Arbeitsgedächtnisses und Effekten zu dessen Entlastung beschäftigt, um das Lernen zu erleichtern.

Die Grundidee des Instructional Designs besteht darin, die „bestgeeignete Lernumgebung zu finden“ (Niegemann et al. 2008, S. 18). Bestgeeignet meint hier die passende Konzeption von Lernaufgaben für die unterschiedlichen „Lernvoraussetzungen und Rahmenbedingungen“ (ebd.). Anders gesagt, beziehen sich die Instructional Design-Ansätze hauptsächlich auf die „Gestaltung von Instruktionsmaterialien“ (Seel 1991, S. 350), die in Verbindung mit der Konzeption „von ‚Lernumgebungen‘ steh[en]“ (ebd.). Dies kann mit dem Begriff der Lernmaterialien zusammengefasst



werden. Dementsprechend bestehen Lernmaterialien aus einer Aneinanderkettung von Lernaufgaben, die sich von Testaufgaben unterscheiden. Während Testaufgaben zur Überprüfung des Leistungsstandes der Schüler dienen, sollen Lernaufgaben dazu beitragen, Lernprozesse zu fördern. Demnach sind Aufgaben, die den Lehr-Lernprozess begünstigen, als Lernaufgaben zu verstehen. (Vgl. Niegemann et al. 2008, S. 311f.) Innerhalb von Lernmaterialien sind die Lernaufgaben miteinander verwoben, bauen aufeinander auf und bedingen sich gegenseitig, sodass es sich nicht um eine Aneinanderkettung voneinander isolierter Aufgaben handelt. Bevor jedoch die konkrete Gestaltung und Konzeption von Lernmaterialien betrachtet werden kann, muss zunächst das Lernen an sich in den Fokus rücken.

3.1 Lernen und die Architektur des menschlichen Gedächtnisses

Lernen kann grundlegend als eine Verhaltensänderung innerhalb eines bestimmten Zeitraumes definiert werden. Begründet liegt diese Änderung des Verhaltens in dem Stattfinden von Lernprozessen, wobei diese an sich nicht messbar sind, sondern sich erst in den Lernergebnissen widerspiegeln. Die Formen der angesprochenen Veränderungen sind vielfältig. Sie reichen von der Veränderung kognitiver Strukturen durch einen Wissenszuwachs über veränderbare motivationale Aspekte bis hin zur Veränderung in Bezug auf die Körperbeherrschung. (Vgl. Seel 2003, S. 31f.) Das Stattfinden von Lernprozessen ist an gewisse Bedingungen gebunden, die sich in innere und äußere Bedingungen gliedern lassen. Die „individuellen kognitiven Dispositionen“ (Seel 2003, S. 37), unter denen beispielsweise die unterschiedlich ausgeprägte Fähigkeit im Behalten von einzelnen Informationen verstanden werden kann, lassen sich den inneren Bedingungen zuordnen. Gleiches gilt für den „intellektuellen Entwicklungsstand“ (ebd.) sowie für motivationale als auch emotionale Aspekte. Unter den äußeren Bedingungen werden Einflussfaktoren wie das soziale Umfeld verstanden. (Vgl. Seel 2003, S. 37f.) Die Zusammenhänge zwischen den inneren und äußeren Lernvoraussetzungen können als sehr komplex bezeichnet werden. Besonders der motivationale Aspekt war einer der Gründe, warum – zu Beginn der neuen Medien und der damit verbundenen Möglichkeit, multimediale Lernumgebungen zu schaffen – Unterrichtsin-

halte möglichst multimodal¹⁵ präsentiert wurden. Demnach sollten durch Filme, Animationen und Bilder vorzugsweise so viele Sinne wie möglich angesprochen werden. Die Schüler sollten besonders durch die zu ihren eigenen Interessen passenden Präsentationen motiviert werden. In dieser Konstellation konnten jedoch keine besseren Lernerfolge verzeichnet werden. (Vgl. Niegemann, Domagk, Hessel, Hein, Hupfer & Zobel 2008, S. 41) Zierer sieht die geringe Effektstärke der neuen Medien ($d=0,22$) innerhalb der Synthese von Meta-Analysen Hatties darin begründet, dass Lehrkräfte die traditionellen Medien zwar durch die neuen ersetzen, ihren Unterricht jedoch nicht anpassen (vgl. Zierer 2014, S. 71f.).

Im Folgenden sollen gedächtnispsychologische Zusammenhänge geklärt werden, indem der Aufbau des menschlichen Gedächtnisses betrachtet wird. Dazu zählt auch, wie Informationen über einen längeren Zeitraum gespeichert werden können und an welche Bedingungen diese Speicherung gebunden ist.

Wenn von schulischem Lernen die Rede ist, muss immer die Frage behandelt werden, wie neue Informationen angeeignet und mit bereits gespeichertem Wissen verknüpft werden können. Beim Lernen spielen zwei Hauptkomponenten des menschlichen Gedächtnisses eine wichtige Rolle. Diese sind zum einen das *Arbeitsgedächtnis*, dessen Kapazitätsbegrenzung oftmals durch den Flaschenhals-Effekt erklärt wird und zum anderen das *Langzeitgedächtnis*, das unbegrenzt Informationen abspeichern kann. Generell können beim Lernen zwei Phasen voneinander unterschieden werden (vgl. Wellenreuther 2011, S. 9ff.; 2010a, S. 78ff.):

Phase 1: Die Aufnahme von neuen Informationen ist an die Kapazitätsbegrenzung des Arbeitsgedächtnisses gebunden. Die neu ins Arbeitsgedächtnis aufgenommenen Informationen sollten gleich wiederholt oder erinnert werden, da sie ansonsten sofort verloren gehen. Demnach gilt es als Ziel dieser Phase „eine erste ‚Gedächtnisspur‘ anzulegen“ (Wellenreuther 2010a, S. 79) und damit einen ersten Schritt zur langfristigen Speicherung der Informationen im Langzeitgedächtnis zu tätigen. Das Anlegen einer Gedächtnisspur ist dabei hauptsächlich von der Präsentation der Inhalte abhängig.

¹⁵ Die Modalität bezieht sich auf den durch das Medium angesprochenen Sinn. Dementsprechend können Medien beispielsweise visuell (Sehen), auditiv (Hören) und bei einer Kombination audiovisuell sein. (Vgl. Hasselhorn & Gold 2009, S. 365)

Phase 2: Festigung, Verankerung und Automatisierung der Informationen meint einerseits die Speicherung der neu aufgenommenen Informationen im Langzeitgedächtnis und andererseits das Verfügbarmachen dieser. Dementsprechend müssen die zuvor aufgenommenen Informationen geübt, wiederholt und mit bereits vorhandenem Wissen verknüpft werden, wodurch diese im Langzeitgedächtnis verankert werden können. Bei wiederholter Anwendung dieses neu erworbenen Wissens kann der Umgang mit diesen Informationen automatisiert werden.

Innerhalb dieser beiden Phasen finden sich drei Teilabschnitte wieder, die nur in der Theorie voneinander trennbar sind. Dabei handelt es sich um die *Aufnahme*, die *Speicherung* und den *Abruf* der Informationen, die sich folgendermaßen durch das *Grundmodell menschlicher Informationsverarbeitung* darstellen lassen:

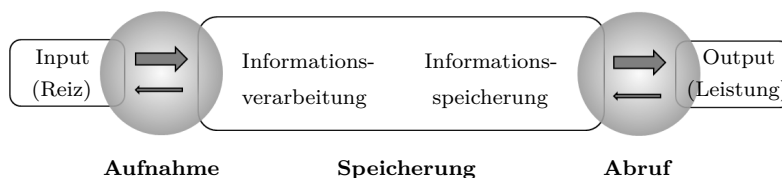


Abbildung 3.1: Grundmodell menschlicher Informationsverarbeitung.¹⁶

Die Aufnahme der Informationen ist an die Wahrnehmung der Reize gebunden. Dieser aktive Prozess ist meist selektiv, sodass Wissen und Gefühle in gleicher Weise ausschlaggebend für die Aneignung von Informationen sind. Die Prozesse der Aufnahme und der Verarbeitung der Informationen sind damit der ersten Phase des Lernens zuzuordnen. Werden die verarbeiteten Informationen gespeichert, machen diese einen Teil des menschlichen Gedächtnisses aus. Im Gedächtnis selbst findet neben einer mentalen Repräsentation des Wissens auch der Aufbau von Handlungsplänen in Form von Schemata statt, die die Informationsaufnahme und damit die selektive Wahrnehmung beeinflussen. Damit bedingt das Vorwissen einer Person, welche neuen Informationen aufgenommen werden. Der Reiz steht demnach mit der Informationsverarbeitung und der -speicherung in einem wechselseitigen Zusammenhang. Erst durch einen erfolgreichen Abruf der Wissensinhalte aus dem Gedächtnis wird deutlich, welche Informationen gespeichert und behalten wurden. Dem Abruf von Gedächtnisinhalten geht die zweite Phase des Lernens voraus. Das

¹⁶ Abbildung aus Edelman & Wittmann 2012, S. 141.

Arbeitsgedächtnis versucht beim Abruf der Informationen aktiv die einzelnen Inhalte aus dem Langzeitgedächtnis zu rekonstruieren. (Vgl. Edelmann & Wittmann 2012, S. 141f.)

Entsprechend dieser Phasen der Informationsverarbeitung wird im Folgenden zunächst genauer auf die Vorgänge im Arbeitsgedächtnis eingegangen, im Anschluss daran findet eine Auseinandersetzung mit der Verankerung neuen Wissens im Langzeitgedächtnis statt und abschließend steht besonders das Zusammenwirken des Arbeits- und Langzeitgedächtnisses im Vordergrund.

3.1.1 Arbeitsgedächtnis

Das Arbeitsgedächtnis spielt einerseits in der ersten Aufnahme neuer Informationen und somit in der ersten Phase des Lernens und andererseits im Erinnern von bereits vorhandenem Wissen eine zentrale Rolle. Über den visuellen, den akustischen und den taktilen Sinn werden Informationen aufgenommen und im Arbeitsgedächtnis mit bereits Bekanntem in Verbindung gebracht.¹⁷ Dabei ist die Kapazität auf sieben Informationen begrenzt. Dementsprechend kann das menschliche Arbeitsgedächtnis sieben voneinander unabhängige Informationen, wie eine Reihe einzelner Ziffern oder Buchstaben, speichern. Handelt es sich aber um Informationseinheiten, die auch als *Chunks* bezeichnet werden und mehrere einzelne Informationen bündeln, können sogar sieben plus maximal zwei Chunks gespeichert und erinnert werden. (Vgl. Wellenreuther 2010a, S. 80ff.; Niegemann et al. 2008, S. 43; Seel 2003, S. 41) Die Zahlenfolge 238957376 ist dementsprechend schwieriger zu merken, als die gleichlange Folge von Buchstaben TAUBASKUN, da sich diese in die drei Silben TAU BAS KUN unterteilen lässt. Die Zahlenfolge hingegen unterteilt sich in 23-89-57-37-6 und demnach fünf Informationseinheiten. Dieses Unterteilen wird auch als *Chunking* bezeichnet. (Vgl. Wellenreuther 2011, S. 10)

Jedoch ist ein Behalten von Informationen, die zwar in Einheiten unterteilt werden können aber keine Bedeutung haben, beinahe unmöglich. Um dies zu verdeutlichen, kann beispielsweise der Versuch unternommen werden, sich folgende aus neun Einheiten bestehende Zeile einzuprägen:

¹⁷ Unberücksichtigt bleiben an dieser Stelle der Geschmackssinn und die olfaktorische Wahrnehmung, weil diese für das schulische Lernen eine untergeordnete Rolle spielen.

1 2 3 4 5 6 7 8 9
DA – SKI – NDS – PIE – LTM – ITE – INE – MB – ALL

Diese vermeintlich aus neun Einheiten bestehende Zeile stellt Silben und Buchstabeneinheiten dar, die auf den ersten Blick inhaltlich völlig bedeutungslos erscheinen. Aus diesem Grund und weil es sich tatsächlich um 25 einzelne Buchstaben beziehungsweise Informationen handelt, kann das menschliche Arbeitsgedächtnis diese Zeile nur sehr schwer speichern. Der in der Zeile enthaltene Satz „DAS KIND SPIELT MIT EINEM BALL“ besteht aus sechs Einheiten oder Chunks und kann problemlos gespeichert werden, da er nun nicht mehr aus einer bedeutungslosen Folge von Buchstaben oder Silben zusammengesetzt ist. Dadurch wird deutlich, dass Chunks nicht aus dem reinen Zusammenschluss von einzelnen Informationen bestehen, sondern vielmehr *Bedeutungseinheiten* und in diesem Fall Wörter beziehungsweise einen ganzen Satz darstellen. (Vgl. Edelmann & Wittmann 2012, S. 145) Demzufolge muss auch der Begriff des Chunkings weiter konkretisiert werden. Beim Chunking handelt es sich demnach nicht nur um den reinen Zusammenschluss von Informationen zu Bedeutungseinheiten, vielmehr schwingt bei diesem Vorgang eine individuelle Ebene mit, mit der Wissensbrücken gebaut werden, um die Informationen zu kombinieren und zu behalten. Dies können zum einen sogenannte Eselsbrücken sein, um sich einzelne Informationen zu merken. Zum anderen und auf die Unterrichtspraxis bezogen kann mit dem Begriff des Chunkings eine Verdichtung von Informationen einhergehen, wenn beispielsweise am Ende einer Unterrichtssequenz deutlich wird, dass die vorigen Erklärungen alle zu einem bestimmten Vorgang oder Begriff zählen. (Vgl. Steiner 2001, S. 167; Mazur 2006, S. 388)

Sollen die aufgenommenen Informationseinheiten im Arbeitsgedächtnis miteinander verarbeitet werden, ist die Kapazitätsgrenze geringer. Demnach können maximal zwei bis drei Chunks gleichzeitig kombiniert und reflektiert werden. Darüber hinaus ist ein Behalten der Informationen von der Wiederholung dieser in einer bestimmten Zeitspanne abhängig. Demnach werden die aufgenommenen Informationen, sofern sie nicht wiederholt und mit bereits Bekanntem verknüpft werden, nach 2 bis 20 Sekunden wieder aus dem Arbeitsgedächtnis gelöscht. (Vgl. Niegemann et al. 2008, S. 43; Wellenreuther 2011, S. 10f.)

Dem Arbeitsgedächtnismodell nach Alan Baddeley entsprechend besteht das Arbeitsgedächtnis aus vier Elementen: der *zentralen Exekutive*

und drei Subsystemen, zu denen das *visuell-räumliche ‚sketchpad‘*¹⁸, die *phonologische Schleife* und der *episodische Puffer* zählen (vgl. Baddeley 2009, S. 44ff.; S. 58; 2007, S. 7ff.; S. 146ff.; 2001, S. 51ff.; Wellenreuther 2010a, S. 80ff.; 2011, S. 11ff.; Rey 2009, S. 37f.):

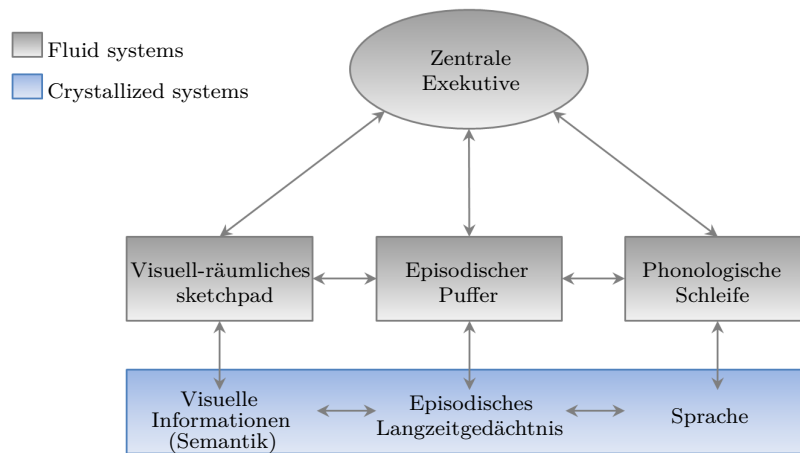


Abbildung 3.2: Erweitertes Arbeitsgedächtnismodell.¹⁹

Die zentrale Exekutive kontrolliert den Informationsfluss und koordiniert die Informationen in den drei Subsystemen.

Das visuell-räumliche sketchpad ist für das räumliche Vorstellungsvermögen ausschlaggebend, nimmt somit visuelle und räumliche Informationen auf und verarbeitet diese. Außerdem werden hier Formen und Gegenstände verarbeitet. Beispielsweise haben jüngere Kinder mehr Probleme, ähnliche Gegenstände (Apfel, Ball) auseinander zu halten als komplett unterschiedliche Motive (Pferd, Ball). Ältere Kinder haben diese Probleme nicht mehr, weil sie die Gegenstände mit bereits bekannten Formen in Verbindung bringen.

Die phonologische Schleife nimmt verbale Informationen, also Gesprochenes oder Gelesenes, auf und verarbeitet diese. Hier findet

¹⁸ Im englischen Original wird diese Einheit von Baddeley als „visuo-spatial sketchpad“ (Baddeley 2001, S. 52; 2007, S. 8; 2009, S. 44) bezeichnet. Der Begriff ‚sketchpad‘ wird von Wellenreuther mit „Skizzenblock“ (2010a, S. 81; 2011, S. 11) und von Rey mit „Notiztafel“ (2009, S. 38) übersetzt. Meines Erachtens nach sind beide Begriffe nicht zutreffend, da der Skizzenblock und die Notiztafel suggerieren, man müsse sich mit einem Stift Notizen machen oder Skizzen anfertigen. In Verbindung mit dem menschlichen Arbeitsgedächtnis erscheint mir dies etwas weit her geholt, da selbst für die Vorstellung einer Notiztafel oder eines Skizzenblocks das visuell-räumliche sketchpad genutzt werden würde. Aus diesem Grund präferiere ich keine der beiden Übersetzungen und bleibe im Folgenden beim englischen Original.

¹⁹ Abbildung aus Baddeley 2009, S. 58; 2007, S. 147; 2003, S. 835; 2000, S. 421 und Rey 2009, S. 38.

eine innere lautlose Wiederholung der verbalen Information statt. Wird ein Wort gehört oder gelesen, sorgt die phonologische Schleife für die Umkodierung dieses Wortes in den eigenen Wortlaut. Wenn dieser Vorgang nicht innerhalb von zwei Sekunden wiederholt wird, geht die verbale Information verloren. Besonders wenn der Inhalt eines Textes erinnert werden soll, ist diese lautlose Wortwiederholung von zentraler Bedeutung. Sie findet hingegen nicht statt, wenn währenddessen bedeutungslose Einzelheiten aufgesagt werden. Wird beispielweise während des Lesens das Wort ‚blau‘ ständig aufgesagt, ist das Behalten des Textinhaltes stark vermindert.

Der episodische Puffer ist in der Lage, Informationen aus der phonologischen Schleife und dem visuell-räumlichen sketchpad zwischenspeichern. Eine der Hauptaufgaben des episodischen Puffers besteht darin, die visuell-räumlichen und phonologischen Informationen zu Informationseinheiten (‚Episoden‘ oder ‚Chunks‘) zu bündeln (vgl. Baddeley 2007, S. 148; 2000, S. 421). Außerdem steht der episodische Puffer in Verbindung mit dem *episodischen Langzeitgedächtnis*, in dem „Ereignisse mit persönlichem raumzeitlichen Bezug (z. B. die Erinnerung an den ersten Kuss)“ (Rey 2009, S. 38) gespeichert werden.²⁰

Die Zusammenarbeit dieser vier Arbeitsgedächtnismodellkomponenten lässt sich am einfachsten anhand folgender Beispiele erklären: Wenn ein Kind die Bezeichnung eines neuen Gegenstandes (z. B. Auto) lernt, müssen die verbale und visuelle Information gemeinsam miteinander verarbeitet werden. Demnach wird mithilfe des visuell-räumlichen sketchpads die Form und Gestalt des Autos und durch die phonologische Schleife der Wortlaut des Begriffs Auto eingepägt. (Vgl. Wellenreuther 2010a, S. 82ff.;

²⁰ Der episodische Puffer zählt als eine Erweiterung des ursprünglichen Arbeitsgedächtnismodells Baddeleys (auch Drei-Komponenten-Modell genannt – bestehend aus der zentralen Exekutive, dem visuell-räumlichen sketchpad und der phonologischen Schleife). Baddeley selbst hat die Existenz des episodischen Puffers als eine vierte Arbeitsgedächtnismodellkomponente lange bezweifelt. Im Jahr 2000 weist er in seinem Artikel „The episodic buffer: a new component of working memory?“ auf ein Phänomen hin, das mit dem bestehenden Modell nicht erklärt werden kann: Ein Proband, der große Schwierigkeiten beim Merken einer vorgelesenen Zahlenfolge aufweist, kann sich eine längere Zahlenfolge merken, wenn er diese zusätzlich visualisiert bekommt. Infolge dessen schließt Baddeley darauf, dass die Informationen aus den beiden Subsystemen (visuell-räumliches sketchpad und phonologische Schleife) miteinander verarbeitet und zwischengespeichert werden müssen. Die zentrale Exekutive verbindet diese Informationen zu Episoden, die innerhalb des episodischen Puffers zwischengespeichert werden und als solche bewusst abrufbar sind. (Vgl. Baddeley 2000, S. 417ff.)

2011, S. 12ff.) Die zentrale Exekutive koordiniert hier die Zusammenarbeit und sorgt gleichzeitig dafür, dass im episodischen Puffer dieses Ereignis kurzzeitig abgespeichert wird. Über den episodischen Puffer werden im episodischen Langzeitgedächtnis die Form und das Wort des gelernten Gegenstandes gespeichert. Die Form des Autos (visuelle Information/Semantik) und der Begriff (Sprache) werden im Langzeitgedächtnis einzeln abgespeichert. Doch nicht nur das Lernen neuer Begriffe kann mit dem Arbeitsgedächtnismodell aus Abbildung 3.2 erklärt werden. Angenommen man soll sich daran erinnern, wie viele Türen in dem eigenen Haus oder in der eigenen Wohnung vorhanden sind. Mittels des visuell-räumlichen sketchpads findet eine räumliche Vorstellung der einzelnen Zimmer beziehungsweise der einzelnen Türen statt, die wiederum durch die phonologische Schleife gezählt werden. Durch den episodischen Puffer wird einerseits gespeichert, in welchem Zimmer die Türen bereits gezählt wurden und andererseits ruft der episodische Puffer aus dem Langzeitgedächtnis den Grundriss des eigenen Hauses oder der eigenen Wohnung ab. Kontrolliert wird dieser Vorgang durch die zentrale Exekutive. (Beispiel leicht verändert aus Baddeley 2009, S. 44)

Die zentrale Exekutive, das visuell-räumliche sketchpad, die phonologische Schleife und der episodische Puffer werden in Abbildung 3.2 als *fluid systems* und die Semantik, das episodische Langzeitgedächtnis sowie die Sprache werden als *crystallized systems* bezeichnet.²¹ Da das Langzeitgedächtnis langfristig Informationen speichert, wird in diesem Zusammenhang oftmals von festgesetztem beziehungsweise ‚kristallisiertem‘ Wissen gesprochen. Die Arbeitsgedächtnismodellkomponenten, die zum fluid system zählen, zeichnen sich durch kurzfristig zu verarbeitendes Wissen aus. Die Informationen können hier nur kurzzeitig zwischengespeichert werden, bevor sie entweder ins Langzeitgedächtnis aufgenommen oder gelöscht werden. Die Informationen haben auf die fluid system-Komponenten keinen Einfluss, wohingegen das Langzeitgedächtnis fortwährend durch neu-

²¹ Die Begriffe „Fluid systems“ und „Crystallized systems“ (Baddeley 2009, S. 58) werden von Rey mit „Fluide Systeme“ und „Kristalline Systeme“ (2009, S. 38) übersetzt. Die Bezeichnung der Systeme bezieht sich dabei weniger auf die Beschaffenheit beziehungsweise die Charakterisierung der Systeme an sich. Vielmehr meint Baddeley damit das Wissen und die Informationen, die innerhalb der einzelnen Komponenten verarbeitet werden (vgl. Baddeley 2003, S. 835). Baddeley spricht in seinen Ausführungen beispielsweise von „crystallized knowledge“ (2003, S. 835) und „fluid capacities“ (2000, S. 421). Um Diskrepanzen durch sinnverfälschte Übersetzungen vorzubeugen, wird für den weiteren Verlauf die englische Originalbezeichnung verwendet.

es Wissen verändert beziehungsweise erweitert wird. (Vgl. Baddeley 2000, S. 421; 2003, S. 835; Rey 2009, S. 38f.)

3.1.2 Langzeitgedächtnis

Die Speicherkapazität des Langzeitgedächtnisses wird als annähernd unbegrenzt angesehen. In dieser Tatsache unterscheidet sich das Langzeitgedächtnis elementar vom Arbeitsgedächtnis, welches sich durch einen Kurzzeitspeicher auszeichnet. Informationen, die ins Langzeitgedächtnis gelangen und aus diesem wieder abgerufen werden können, bilden das Wissen eines Menschen. Demnach enthält das Langzeitgedächtnis „das gesamte Wissen einer Person und [repräsentiert] Erfahrungen in kognitiven Strukturen [...], die als ‚Schemata‘ bezeichnet [...] werden“ (Seel 2003, S. 51). Wie bereits in den vorangegangenen Ausführungen durch das episodische Langzeitgedächtnis angedeutet, ist das meiste Wissen einer Person erfahrungsbezogen. Das episodische Gedächtnis, in dem erfahrungsgebundene Erinnerungen gespeichert werden, unterscheidet sich von dem *semantischen Gedächtnis*, das als Speicher für sämtliche Kenntnisse gelten kann, die ein Individuum über die Welt hat. Aus diesem Grund wird dieses Wissen auch als ‚Weltwissen‘ bezeichnet und es umfasst Personennamen und die Bedeutung von Begriffen. Methoden und Gegebenheiten, mit und unter denen dieses Wissen angeeignet wurde, werden im episodischen Gedächtnis gespeichert. (Vgl. Seel 2003, S. 42; Wellenreuther 2010a, S. 85) Bezugnehmend auf das Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley aus Abbildung 3.2 werden die visuelle Semantik und die Sprache im semantischen Gedächtnis gespeichert. Innerhalb des episodischen Gedächtnisses werden längst vergangene Erfahrungen im *autobiografischen Gedächtnis* zusammengefasst. In diesem Zusammenhang spielt auch die ‚kindliche Amnesie‘ eine Rolle, der zufolge das autobiografische Gedächtnis eines Menschen bis zu einem Alter von höchstens drei bis vier Jahren zurückreicht. Begründet wird diese Tatsache damit, dass Kinder unter drei Jahren noch keine endgültigen Schemata zu alltäglichen Ereignissen ausgebildet haben und sie demzufolge besondere Ereignisse nicht behalten können. (Vgl. Wellenreuther 2010a, S. 85f.; Gruber 1999, S. 108)

Neben der Unterscheidung zwischen dem episodischen und dem semantischen Wissen mit den zugehörigen Gedächtnissen kann die Klassifizierung von Wissen in *deklaratives* und *prozedurales Wissen* angeführt werden. Dementsprechend wird im Langzeitgedächtnis zwischen dem de-

klarativen Gedächtnis, in dem Faktenwissen gespeichert wird, und dem prozeduralen Gedächtnis, das „Wisse[n] über kognitive Operationen und Umgangsweisen mit deklarativem Wissen“ (Seel 2003, S. 42) speichert, unterschieden. (Vgl. Seel 2003, S. 40ff.)

Da das Langzeitgedächtnis für das schulische Lernen eine zentrale Rolle in der zweiten Phase des Lernens – der Festigung, Verankerung und Automatisierung der Informationen – einnimmt, rückt für die folgenden Überlegungen die Klassifizierung von Wissen in den Hintergrund. Vielmehr soll das Hauptaugenmerk auf dem Erwerb von Schemata im Langzeitgedächtnis liegen und in diesem Kontext gilt es zunächst, den Zusammenhang von Schemata und *mental*en Modellen zu verdeutlichen. Grundlegend wird für die folgenden Darstellungen *Lernen als Wissenserwerb* verstanden, wobei es sich hauptsächlich um den Erwerb oder die Modifizierung von bereits bestehenden Wissensrepräsentationen handelt (vgl. Steiner 2001, S. 165). Beruhend auf kognitionspsychologischen Annahmen kann davon ausgegangen werden, dass die Organisation des vollständigen Wissens einer Person durch Schemata arrangiert wird. Diese Schemata müssen zunächst erworben und folglich immer weiter herausgebildet werden. Aus diesem Grund findet sich der Schemabegriff nicht nur in der Kognitions- sondern auch in der Entwicklungspsychologie wieder. Um dies zu verdeutlichen, kann die biologische Entwicklung des zentralen Nervensystems, oder genauer, des Gehirns betrachtet werden. Für das Lernen ist hauptsächlich die Großhirnrinde (Kortex) zuständig. Hier werden unter anderem kognitive Leistungen wie das Sprechen und Denken erbracht sowie Handlungskompetenzen entwickelt. Die ersten entwickelten Funktionen im Kortex sind für die Wahrnehmung, die Motorik und deren Koordination zuständig. Aus diesem Grund wird die Großhirnrinde in den sensorischen, den motorischen und den Assoziationskortex gegliedert. Der sensorische und der motorische Kortex registrieren und verarbeiten Sinneseindrücke und sind für die gezielte Steuerung von Bewegungen verantwortlich. Der Assoziationskortex stellt den größten assoziativen Speicher für das Wissen und Können einer Person dar. (Vgl. Edelman & Wittmann 2012, S. 19f.; Seel 2003, S. 51)

Ein Kleinkind entdeckt seine Umwelt zunächst durch seine sensorischen und motorischen Fähigkeiten, indem Gegenstände unterschiedlich klassifiziert werden. Die ersten Handlungen, die Kleinkinder mit Gegenständen vollziehen, beschränken sich zunächst auf das Ertasten und den

Versuch, an einem Gegenstand zu saugen. Durch die Wiederholung dieser Handlungen werden Objekte klassifiziert und es bilden sich enaktive Schemata, welche zur sensomotorischen Intelligenz zählen und die Basis für die folgende kognitive Entwicklung darstellen. Enaktive Schemata bilden sich dementsprechend für die Umwelt der Kleinkinder aus und so findet eine Klassifizierung von beispielsweise ‚Essbarem‘ und ‚Saugbarem‘ statt. (Vgl. Seel 2003, S. 51)

Mit dem Begriff des Schemas geht eine Erkenntnismethode von Begriffen aus der Umwelt einher. Verfügt eine Person etwa über das Schema ‚Fahrrad‘, hat sie gleichzeitig eine Vorstellung davon, wie das Fahrrad aussehen könnte. In diesem Schema wird das Wissen über allgemeine Merkmale, wie das Vorhandensein von zwei Rädern, einem Rahmen, einem Lenker und zwei Pedalen, gespeichert. Das Schema kann beispielsweise im Hinblick auf die Form und Farbe des Rahmens, den Gepäckträger und die Beleuchtung aktualisiert beziehungsweise ausgefüllt werden. Ein Schema ist also eine mentale Wissensstruktur, die einer Person nicht bewusst ist und die in alltäglichen Situationen hilft, Gegenstände zu identifizieren. Neue Informationen werden in die bereits vorhandenen Wissensstrukturen eingebaut, wodurch das Schema fortwährend erweitert beziehungsweise vervollständigt wird. Darüber hinaus interagieren Schemata miteinander und bilden gemeinsam ein semantisches Netzwerk. Ein Schema stellt in diesem Verbund einen derzeit aktivsten Bereich dar. (Vgl. Steiner 2001, S. 166; Gruber 1999, S. 54) Die meisten Schemata sind demnach in Schema-Netzwerke gebunden, wodurch eine Hierarchie entsteht. So ist das Schema ‚Fahrrad‘ dem übergeordneten Schema ‚Fortbewegungsmittel‘ zuzuordnen und weist selbst die Unterkategorie ‚Mountainbike‘ auf. Speziellere Varianten von komplexen Schemata sind *Skripts*, durch die drehbuchartige Handlungsabläufe gespeichert werden, welche sich auf definierte Abfolgen von Ereignissen in bestimmten Situationen beziehen. So ist beispielsweise der wöchentliche Einkauf als Handlungswissen gespeichert. Die Handlungsabläufe beginnen hier bereits beim Schreiben einer Einkaufsliste und gehen über den Einkauf selbst bis hin zum Bezahlen an der Kasse und enden beim Einräumen der Einkäufe in den hauseigenen Kühlschrank. Diese Handlungsabläufe beinhalten eine Vielzahl an Variablen, die für den weiteren Ablauf ausschlaggebend sind. Wenn beispielsweise eine Inventur in dem vertrauten Supermarkt stattgefunden hat und die Produkte umsortiert wurden oder ein Produkt ausverkauft ist, müssen

die Handlungsabläufe umstrukturiert werden. Demzufolge muss zunächst nach den gewünschten Produkten oder Alternativen gesucht werden, damit der Einkauf fortgesetzt werden kann. (Vgl. Edelmann & Wittmann 2012, S. 130f.; Hasselhorn & Gold 2009; S. 53) Da das menschliche Gehirn ein riesiges neuronales Netzwerk darstellt, ist es schwierig, ein einzelnes Schema exakt zu lokalisieren. Es lässt sich zwar festlegen, welcher Bereich des Kortex vorzugsweise für welches Körperteil zuständig ist, jedoch ist diese Eingrenzung für das Wissensgedächtnis nicht möglich, da hier Neuronen und deren Synapsen aus mehreren Bereichen miteinander kommunizieren.²² Aus diesem Grund ist der Schemabegriff oftmals umstritten, da gespeicherte Informationen meist nicht nur einem konkreten Schema entstammen, sondern über mehrere aktive neuronale Knoten ins Arbeitsgedächtnis gerufen werden. (Vgl. Palm 1988, S. 58ff.; Seel 2003, S. 51f.) Demzufolge dürfen Schemata des semantischen Gedächtnisses nicht als bestimmbare Orte im menschlichen Kortex angesehen werden, vielmehr sind sie „als Eigenschaften komplexer Netzwerke [zu verstehen], die sich aus vielen kleinen neuronalen Kreisläufen zusammensetzen“ (Seel 2003, S. 52).

In Zusammenhang mit dem Schemabegriff können auch mentale Modelle als Wissensrepräsentationen angeführt werden. Bei mentalen Modellen handelt es sich im Gegensatz zu Schemata um die Repräsentation eines gegenwärtigen Zustandes. So kann sich das enthaltene Wissen einerseits auf Begriffe und Handlungsabläufe beziehen, zum anderen aber auch auf visuell-räumliche und sprachliche Informationen. (Vgl. Steiner 2001, S. 166; Edelmann & Wittmann 2012, S. 139) Ursprünglich wurden mentale Modelle für physikalische Vorgänge untersucht, indem beispielsweise Vorstellungen über den elektrischen Strom abgefragt wurden. Ein mentales Modell kann hier das Analogmodell von einem Wasserkreislauf sein, in dem der Druck des Wassers der elektrischen Spannung entspricht und die Breite des Wasserschlauches dem elektrischen Widerstand. Demzu-

²² Die beiden Hemisphären der Großhirnrinde sind bezüglich der Informationen von den Sinnesorganen und der Koordination der Körperteile und damit der Steuerung von Bewegungen in Hirnareale gegliedert. Dementsprechend lassen sich im sensorischen und im motorischen Kortex Regionen für Schemata zu bestimmten Sinneseindrücken oder gezielten Bewegungen zuordnen. Der Assoziationskortex stellt den Bereich dar, in dem das Wissen und Können gespeichert ist und der mit dem sensorischen und dem motorischen Kortex interagiert. Da Wissensbestände individuell sind, sind auch die Gedächtnisspuren nicht immer zu vereinheitlichen. Damit lassen sich komplexe Wissensbestände nicht auf nur eine Region festsetzen. (Vgl. Edelmann & Wittmann 2012, S. 30ff.)

folge beinhalten mentale Modelle subjektives Wissen, das weder fachlich korrekt noch als vollständig anzusehen ist. Ein mentales Modell ist jedoch nicht als reine Veranschaulichung bestimmter Prozesse zu verstehen, vielmehr können durch diese Arbeitsmodelle auch Abläufe mental simuliert und plausible Schlussfolgerungen aus ihnen gezogen werden. (Vgl. Dörr, Seel & Strittmatter 1986, S. 169ff.) Durch die innere Simulation äußerer Vorgänge können Aufgaben und Probleme bewältigt werden, indem in der Vorstellung Handlungen ausgeführt, die jeweiligen Folgen abgewägt und durch deren Interpretation Schlussfolgerungen gezogen werden. Das schlussendliche „Produkt [eines mentalen Modells] besteht aus der Interpretation dessen, was geschehen kann, wenn wir eine Handlung ausführen“ (Seel 2003, S. 52). Mentale Modelle stützen sich auf eine Wissensbasis und sind an die Fähigkeit gebunden, dieses Wissen in verschiedenen Situationen anwenden zu können. (Vgl. Edelman & Wittmann 2012, S. 139f.; Seel 2003, S. 51f.; Dörr, Seel & Strittmatter 1986, S. 169) Wenn der Versuch unternommen werden soll, Schemata und mentale Modelle miteinander zu verknüpfen, so ist in Schemata bereits vorhandenes Wissen gespeichert und in diesem Zusammenhang wird von molaren Wissensstrukturen gesprochen. Durch mentale Modelle werden die in den Schemata gespeicherten Informationen aktuell genutzt und in mentale Simulationen überführt. (Vgl. Gruber 1999, S. 54) Wenn dieser Zusammenhang auf das schulische Lernen übertragen wird, müssen Schüler im Unterricht zunächst Schemata erwerben, die in der weiteren Schullaufbahn fortwährend vervollständigt werden. Aus diesem Grund steht im Folgenden der Aufbau von Schemata im Langzeitgedächtnis im Vordergrund.

3.1.3 Aufbau und Automatisierung von Schemata

Für den Erwerb, den Aufbau und die Automatisierung von Schemata im Langzeitgedächtnis ist besonders die Zusammenarbeit zwischen dem Arbeits- und Langzeitgedächtnis von zentraler Bedeutung. An dieser Stelle lässt sich das Beispiel des Kleinkindes, das enaktive Schemata seiner Umwelt ausbildet, wieder aufgreifen. Hier kann ein Schema zunächst als ein Verhaltensplan des Kindes verstanden werden. Die Klassifizierung von Gegenständen ist vorerst nicht begrifflicher Natur, sondern bezieht sich darauf, welche Handlungen mit einem Gegenstand ausgeführt werden können. Durch die Wiederholung dieser Handlung entsteht dann ein Schema. Aus diesem Grund entsteht beispielsweise das ‚Greifschema‘, welches sich

durch Objekte ausgezeichnet, die in die Hände der Kinder passen. Analog dazu bilden sich weitere Schemata aus – wie die bereits genannten Schemata des ‚Essbaren‘ und ‚Saugbaren‘ –, die das Kind dazu befähigen, seine Umwelt zu erkennen. Im Verlauf der fortwährenden Entwicklung werden diese Schemata den äußeren Umständen entsprechend akkomodiert und kombiniert. Beispielsweise wirft ein Kleinkind Objekte zu Boden und registriert, dass eine erwachsene Person diese Gegenstände wieder aufhebt. Das nächste Herunterwerfen erfolgt dann mit der Erwartungshaltung, dass etwa die Mutter oder der Vater dem Kind den am Boden liegenden Gegenstand wiedergibt. Folglich werden die Schemata durch das Anwenden und Erproben in neuen und unbekanntem Situationen immer komplexer. Mit der Entwicklung der Sprache werden die Schemata sukzessive mit Begriffen gefüllt, was zur Folge hat, dass sich die handlungsbezogenen zu begrifflichen Erkenntnisinstrumenten abwandeln. (Vgl. Steiner 2001, S. 166; Seel 2003, S. 52f.)

Um ein Schema nicht nur zu erwerben, sondern nachhaltig zu festigen, ist die Automatisierung dieses Schemas von zentraler Bedeutung. Während ein Schema zunächst auf ein kleines Aufgabengebiet beschränkt ist, wird es umso komplexer, je breiter dessen Anwendungsbereich ist. Neue Inhalte werden bewusst mit dem Schema in Verbindung gebracht. Eine bewusste Verarbeitung von Informationen findet im Arbeitsgedächtnis statt und ein Schema agiert hier als zentrale Exekutive (siehe das Arbeitsgedächtnismodell nach Baddeley in Abbildung 3.2 auf Seite 37). Für die Entwicklung eines Schemas spielt demnach das Arbeitsgedächtnis eine zentrale Rolle. Bewusst verarbeitete Informationen fordern freie kognitive Kapazitäten ein, sodass als Ziel für die Entwicklung von Schemata deren automatisierte Verfügbarkeit angesehen werden kann. Dadurch können die Informationen aus den Schemata beinahe unbewusst abgerufen werden. Folglich wird das Arbeitsgedächtnis weniger belastet, da mehr freie Kapazitäten vorhanden sind, um sich auf die zu lösenden Probleme zu konzentrieren. (Vgl. Rey 2008, S. 11f.). Bei der Automatisierung von Schemata, die nur durch intensive und lange Übung erreicht werden kann, können zwei Unterschiede gemacht werden: Zum einen geht es um „[d]as automatisierte Erkennen“ (Wellenreuther 2010a, S. 86) von Problemen und deren Einordnung in ein Schema, zum anderen handelt es sich um „das automatisierte Ausführen von Operationen“ (ebd.), um erkannte Probleme lösen zu können. Als Beispiel lässt sich das Lesen eines Textes

anführen: Während sich Grundschul Kinder, die das Lesen erst lernen, auf das Entziffern einzelner Buchstaben und Wörter konzentrieren müssen, können Erwachsene ihre Konzentration meist auf den Inhalt des Textes richten. In diesem Beispiel haben die Erwachsenen bereits ein ‚Leseschema‘, das aus mehreren Unterschemata für Buchstaben, für Wörter und für Sätze besteht, ausgebildet und automatisiert. Gleiches gilt für die Bedeutung des Inhaltes von Texten: Während Personen, die noch kein Schema zu einer beschriebenen Thematik ausgebildet haben, einen entsprechenden Text mühsam lesen und teilweise Sätze mehrfach erfassen müssen, überfliegen Personen mit einem bereits vorhandenen und automatisierten Schema den Text lediglich, da sie die Bedeutung des Textes schneller erfassen können. (Vgl. Wellenreuther 2010a, S. 86)

Gefestigte und automatisierte Schemata im Langzeitgedächtnis entlasten das Arbeitsgedächtnis, da sie dessen begrenzte Kapazität nicht beanspruchen. Wenn Informationen im Langzeitgedächtnis fest verankert werden, kann das Vorhandensein von Schemata mit einer Bibliothek verglichen werden: Um sich in einer Bibliothek zurecht finden zu können, ist ein gut strukturiertes und ständig aktualisiertes Netzwerk von Schlagworten und Querverbindungen unabdingbar. Gleiches gilt für das menschliche Langzeitgedächtnis. So können in Schemata enthaltene Informationen durch Assoziationen hervorgerufen werden und diese Informationen müssen fortwährend vertieft, erweitert und aktualisiert werden. (Vgl. Wellenreuther 2010a, S. 109ff.; Niegemann et al. 2008, S. 44) Besonders beim Lernen neuer Informationen kann die Herstellung eines Kontextes wichtig sein, da voneinander isolierte Informationen durch einen Kontext miteinander verbunden werden können. Dadurch sind die Inhalte assoziativ miteinander verkettet und ein späteres Reproduzieren der gesamten Inhalte innerhalb des Kontextes kann durch das Erinnern an eine Einzelheit erfolgen. (Vgl. Birbaumer & Schmidt 2007, S. 237)

In diesem Zusammenhang schlägt Ausubel eine Vorstrukturierung der Inhalte durch einen *Advance Organizer* vor, um das Vorwissen zu aktivieren und damit eine Verknüpfung der neuen Informationen zu den vorhandenen Schemata zu schaffen. Dieser kann als ein Visualisierungsverfahren betrachtet werden, mit dem ein Einstieg für das Lernen neuer Informationen gelingen kann. (Vgl. Niegemann et al. 2008, S. 181) Dadurch kann der Advance Organizer helfen, mittels Ankerbegriffen Assoziationen aus dem Langzeitgedächtnis mit neuen Inhalten zu verknüpfen

(vgl. Seel 2003, S. 157). Eine Vorstrukturierung des Themas in Form eines Advance Organizers soll dem Lerner einerseits deutlich machen, über welches Vorwissen er verfügt und andererseits, welches Vorwissen als Basis für das Verstehen der neuen Informationen dient (vgl. Niegemann et al. 2008, S. 181; Glöckel 2003, S. 130). Eine Organisation und Vorstrukturierung der fachlichen Inhalte ist wichtig, damit ein Überblick über die Sachverhalte geschaffen wird und so bereits ein erstes Gerüst eines Schemas aufgebaut beziehungsweise in Erinnerung gerufen werden kann. Dadurch wird ein allgemeiner begrifflicher Rahmen für den neuen Sachverhalt geschaffen, was besonders dann von Bedeutung ist, wenn es keine Anknüpfungspunkte in den vorhandenen Wissensstrukturen zu den neuen Informationen gibt. Ein Advance Organizer besteht aus einer für den Adressaten verständlichen Darstellung der Themenschwerpunkte, indem eine gewisse Abstraktion und Reduktion der Inhalte erfolgt. Es handelt sich dabei nicht um eine bloße Aufzählung der Inhalte oder um einen Ablaufplan, sondern um eine Themenvernetzung mittels Ankerbegriffen. Der Advance Organizer kann die Lerner für ein Thema motivieren, wobei dies unabhängig von dem jeweiligen Vorwissen ist, da die Effektivität des Advance Organizers von dessen Gestaltung abhängig ist. Daneben bietet der Advance Organizer eine Orientierungshilfe für die neuen Informationen. (Vgl. Hasselhorn & Gold 2009, S. 55f.; Niegemann et al. 2008, S. 181; Seel 2003, S. 156f.; Glöckel 2003, S. 130) Langfristiges Lernen lässt sich nachweislich mit einem Advance Organizer fördern. In Hatties Synthese von Meta-Analysen erzielt der Advance Organizer eine Effektstärke von $d=0,41$, was einem mittleren bis hohen Effekt entspricht. (Vgl. Hattie 2013, S. 199)

Als Voraussetzung für die Festigung, Verankerung und Konsolidierung von Wissen im Langzeitgedächtnis kann das Verstehen der Inhalte angesehen werden. Der Verstehensprozess kann durch positive Gefühle währenddessen unterstützt werden. Jedoch ist ein Lernen nicht damit abgeschlossen, dass Inhalte verstanden werden. Findet kein systematisches Wiederholen und aktives Erinnern des bereits Verstandenen statt, kann Gelerntes nach einiger Zeit nur teilweise wiedergegeben werden. Sollen beispielsweise Inhalte eines Textes gelernt und behalten werden, kann eine eigene Zusammenfassung der Informationen hilfreich für das aktive Erinnern der Inhalte sein, da die Bedeutung des Textes tiefgreifender bearbeitet wird als bei einem Überfliegen. (Vgl. Hasselhorn & Gold 2009,

S. 55f.; Niegemann et al. 2008, S. 181; Seel 2003, S. 156f.) Das Lernen wird dabei durch drei verschiedene Wissensformen charakterisiert (vgl. Wellenreuther 2010a, S. 109ff.):

1. Faktenwissen: z. B. mathematische Fakten, wie das Einmaleins oder Fakten für Fremdsprachen, wie verschiedene Vokabeln.
2. Automatisierte Fähigkeiten: z. B. das handschriftliche Schreiben oder das Tippen mit einer Tastatur, aber auch sportliche Fähigkeiten, wie die Schrittfolge beim Hochsprung und mathematische Fertigkeiten, wie das schriftliche Dividieren oder Multiplizieren.
3. Differenzierte Problemlösefähigkeiten: z. B. das Lösen eines mathematischen Problems, das Interpretieren eines Gedichts oder das Schreiben einer gegliederten Inhaltsangabe.

Diese drei Wissensformen bauen aufeinander auf. Wenn beispielsweise im Mathematikunterricht innerhalb der Aufgabenbearbeitung Probleme gelöst werden sollen, für die das Anwenden binomischer Formeln grundlegend ist, dann müssen diese zunächst als Faktenwissen abgespeichert sein. Darüber hinaus muss auch die Fähigkeit vorhanden sein, diese automatisiert zu erkennen und anzuwenden. Nur so sind genügend freie Kapazitäten für das Lösen des mathematischen Problems vorhanden. Beherrscht ein Schüler die binomischen Formeln nicht, ist es für ihn schwierig, sich auf das Problem zu konzentrieren, da das Arbeitsgedächtnis mit der Menge der zu verarbeitenden Informationen überlastet ist. Generell gilt als Voraussetzung für das Verstehen von Inhalten, dass alle relevanten Informationen im Arbeitsgedächtnis vollständig verarbeitet werden. Wenn zu viele Informationen simultan verarbeitet werden müssen, damit Verständnis eintritt, wird das Arbeitsgedächtnis kognitiv überlastet. Daraus resultiert, dass keine weiteren Informationen verarbeitet werden können. (Vgl. Wellenreuther 2010a, S. 109ff.; Niegemann et al. 2008, S. 44) Mit der *Überlasttheorie* des Arbeitsgedächtnisses beziehungsweise der *Cognitive Load Theorie* befasst sich der folgende Abschnitt. In diesem Zusammenhang wird auch thematisiert, welche schulischen Maßnahmen zu einer Entlastung des Arbeitsgedächtnisses beitragen.

3.2 Cognitive Load Theorie

Die *Cognitive Load Theorie* geht auf den australischen Professor John Sweller zurück und ist grundlegend dem Instructional Design-Ansatz verpflichtet. Dadurch stehen die angestellten Überlegungen in Wechselwirkung mit dem Lernen durch Instruktionsmaterialien. Innerhalb des Instructional Design-Ansatzes steht besonders im Vordergrund, auf welche Art und Weise fachliche Informationen adäquat organisiert und präsentiert werden können. Ausgangspunkt ist dabei immer die begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses. Dementsprechend stützt sich die Cognitive Load Theorie nur auf instruktionelle Gestaltungsmaßnahmen, die der Entlastung des Arbeitsgedächtnisses dienen. (Vgl. Sweller, van Merriënboer & Paas 1998, S. 262)

Die ersten Ansätze der Cognitive Load Theorie formuliert Sweller 1988, indem er beschreibt, dass die kognitive Belastung des Arbeitsgedächtnisses umso höher ist, je mehr Informationen während eines Problemlöseprozesses verarbeitet werden müssen (vgl. Sweller 1988, S. 265). Für die Cognitive Load Theorie können die bereits dargestellten Konzepte als grundlegend angesehen werden. Demnach basiert die Theorie auf der Kapazitätsbegrenzung des Arbeitsgedächtnisses und greift das Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley auf. Lernen bedeutet, Schemata zu erwerben und diese durch wiederholtes Üben zu automatisieren. Als Resultat eines Lernprozesses wird somit eine Veränderung im Langzeitgedächtnis angesehen und in diesem Zusammenhang gilt dessen Kapazität als beinahe unbegrenzt. Darüber hinaus unterscheidet Sweller zwischen Experten und Novizen: Experten haben im Gegensatz zu Novizen bereits Schemata zu einem bestimmten Themenbereich entwickelt und haben demnach eine höhere Expertise. Sie können Probleme schneller und einfacher lösen, da sie auf geübte und erfahrungsbezogene Schemata zurückgreifen können. (Vgl. u. a. Sweller 1988, S. 257ff.; 1994, S. 295ff.; Sweller et al. 1998, S. 251f.)

Somit ist das Vorhandensein von Schemata ausschlaggebend für die Expertise. Existieren noch keine Schemata zu einem bestimmten Themenbereich, ist das Verarbeiten komplett neuer Informationen durch das Arbeitsgedächtnis anstrengender, da hier keine Zentrale Exekutive vorhanden ist und somit die Koordination der neuen Informationen in den Subsystemen freie Kapazitäten einfordert (vgl. Sweller 2005, S. 19). Als Beispiel lässt sich erneut das Lesen von Texten anführen. Die existieren-

den Schemata für Buchstaben, Wörter und Satzteile sind für das Erkennen verschiedener Varianten einzelner Buchstaben und Wörter unterschiedlich stark ausgeprägt. Aus diesem Grund sind wir in der Lage, verschiedenartige Handschriften lesen zu können. (Vgl. Sweller 1994, S. 297) Schemata für Wörter und Wortkombinationen helfen bei der Entschlüsselung unleserlicher Buchstaben, wodurch die Buchstaben-Schemata fortwährend erweitert werden. Umso vielschichtiger das Leseschema einer Person ist, desto höher ist auch dessen Lese-Expertise. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 255f.) Expertise zeichnet sich aber nicht nur durch das Vorhandensein komplexer Schemata aus, vielmehr ist die automatische Verfügbarkeit der enthaltenen Informationen von zentraler Bedeutung. Erst dann zeichnen sich erhebliche Leistungsunterschiede zwischen Experten und Novizen ab. Sweller beruft sich auf die Befunde zur Expertiseforschung von (u. a.) De Groot (1965) und Chase & Simon (1973), die bei Schach-Partien das Vorgehen von Meistern mit dem Handeln von verhältnismäßigen Anfängern vergleichen. Der zentrale Unterschied zeigt sich in der Fähigkeit, sich an Schachbrett-Konstellationen aus realen Spielsituationen erinnern zu können. Da die Schach-Meister auf ein erheblich größeres Repertoire an Spielsituationen und zugehörigen Zügen, das sie in ihrer Vergangenheit erworben haben, zurückgreifen können, erkennen sie zunächst Problemzustände wesentlich schneller als Novizen und können darüber hinaus die darauffolgenden möglichen Spielzüge voraussagen. Je höher also die Expertise einer Person ist, desto besser ist auch deren Fähigkeit, Problemzustände zu erkennen und in einem nächsten Schritt zu lösen. Die Problemlösefähigkeit ist somit an die Existenz von Schemata im Langzeitgedächtnis und an die Verfügbarkeit der enthaltenen Informationen gebunden. (Vgl. Sweller 2005, S. 20) Die im Langzeitgedächtnis gespeicherten Schemata haben aber nicht nur die Funktion, das Wissen einer Person zu organisieren und zu speichern. Darüber hinaus reduzieren sie die kognitive Belastung des Arbeitsgedächtnisses. Die Begrenztheit des Arbeitsgedächtnisses bezieht sich auf die Anzahl der zu verarbeitenden Elemente. Ein Schema kann eine Vielzahl gelernter Informationen umfassen, wobei es sich nicht um separate Fakten handelt; vielmehr werden komplexe Verbindungen und Verfahren in Zusammenhang mit Fakten gespeichert. Im Arbeitsgedächtnis wird ein Schema unabhängig von dessen Komplexität als eine einzige Einheit gezählt. Durch die automatische Verfügbarkeit von Schemata sind freie Kapazitäten im Arbeitsgedächtnis vorhanden, um neue

Informationen verarbeiten und somit die Schemata erweitern zu können, was gleichermaßen als Ziel eines Lernprozesses angesehen wird. Damit bezieht sich die Begrenztheit des Arbeitsgedächtnisses besonders auf das Verarbeiten neuer Informationen (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 256ff.; Wellenreuther 2010, S. 87f.) Als Basiskonzepte für die Cognitive Load Theorie betont Sweller wiederholt den Erwerb, die Verankerung und die Automatisierung von Schemata im Langzeitgedächtnis. Als Ziel sieht er die Entlastung des Arbeitsgedächtnisses durch das Vorhandensein einer zentralen Exekutive an. Die Kapazitätsbegrenzung des Arbeitsgedächtnisses kann durch stark automatisierte Schemata umgangen werden, da die enthaltenen Informationen und ausgeführten Prozeduren nicht bewusst verarbeitet werden. (Vgl. Sweller 2005, S. 19; Sweller et al. 1998, S. 251ff.)

Die Cognitive Load Theorie befasst sich mit der begrenzten Belastbarkeit des Arbeitsgedächtnisses und sieht als Ziel von Unterricht den Erwerb und die Automatisierung von Schemata an, die für konkrete Problemlöseprozesse nützlich sind (vgl. Sweller et al. 1998, S. 258f.). Die durch den Schulunterricht erworbenen und automatisierten Schemata sollen sich auf domänenspezifisches Wissen beziehen und nicht auf generelle Denkstrategien, da diese womöglich nicht isoliert als Schemata im menschlichen Gedächtnis gespeichert werden können. Prozeduren und Strategien werden immer mit inhaltlichen fachlichen Fakten kombiniert und in Form von Schemata gespeichert. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 255) Bei dem Aufbau, der Erweiterung und der Automatisierung von Schemata findet eine bewusste Verarbeitung der neuen Informationen im Arbeitsgedächtnis statt, bevor diese im Langzeitgedächtnis gespeichert werden. Für die Cognitive Load Theorie steht die leichte und einfache Verarbeitung neuer Informationen durch das Arbeitsgedächtnis im Vordergrund. Dazu müssen drei Formen der kognitiven Belastung unterschieden werden, die in Verbindung mit der Bearbeitung von Lernmaterialien stehen: Die **intrinsische kognitive Belastung** (intrinsic cognitive load) bezieht sich auf den inhaltlichen Aufbau der Informationen im Lernmaterial und damit auf dessen Schwierigkeit. Daneben ist die **extrinsische kognitive Belastung** (extraneous cognitive load) von der Präsentation der Inhalte abhängig. Sie bezieht sich außerdem auf die von Lernenden abverlangten Aktivitäten beim Verarbeiten der Informationen. Die intrinsische kann im Gegensatz zur extrinsischen kognitiven Belastung nicht durch die didaktische Aufbereitung des Lernmaterials verändert werden, weil sie an

dessen Komplexität in Zusammenhang mit den individuellen Lernvoraussetzung gebunden ist. Die extrinsische kognitive Belastung spiegelt die Mühe und den Arbeitsaufwand beim Bearbeiten des Lernmaterials wider, die von der äußeren Gestaltung des Materials beeinflusst wird. Eine im Lernmaterial einfach gestaltete Aufgabenstellung, die alle wichtigen Informationen bereitstellt und das Ziel der Aufgabe verdeutlicht, führt zu einer geringen extrinsischen kognitiven Belastung. Im Gegensatz dazu führt eine Aufgabenstellung mit überflüssigen Zusätzen, bei der die wesentlichen Informationen zunächst herausgefiltert werden müssen, zu einer hohen extrinsischen kognitiven Belastung. Ebenfalls abhängig von der Gestaltung des Lernmaterials, aber dennoch von der extrinsischen kognitiven Belastung zu unterscheiden ist die **lernrelevante kognitive Belastung** (germane cognitive load), die sich auf die kognitive Belastung durch die eigentlichen Lernprozesse bezieht. Hier geht es besonders um die kognitive Belastung bei der Konstruktion von Schemata. In Anbetracht der Kapazitätsbegrenzung des Arbeitsgedächtnisses sollte durch eine adäquate Gestaltung von Lernmaterialien die extrinsische Belastung gering gehalten werden, um eine hohe lernrelevante kognitive Belastung zu erzielen. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 258f.; Renkl, Gruber, Weber, Lerche & Schweizer 2003, S. 94f.)

Bevor auf die konkrete Gestaltung von Instruktionsmaterialien eingegangen werden kann, muss zunächst untersucht werden, wie diese Formen der kognitiven Belastung durch den Aufbau der Informationen im Lernmaterial beeinflusst werden und welche Faktoren sich außerdem beim Bearbeiten von Lernmaterialien auf die kognitive Belastung auswirken. Ein wichtiger Faktor, der als Ausgangspunkt für die Gestaltung von Lernmaterialien angesehen werden kann und der dabei hilft, die kognitive Belastung abzuschätzen, ist die *Elementinteraktivität*. Damit ist die Interaktion zwischen einzelnen zu lernenden Elementen gemeint. Besonders die intrinsische kognitive Belastung, die im Folgenden beschrieben wird, ist von der Elementinteraktivität abhängig. Neben dieser Wechselwirkung wird auch geklärt, was unter einer hohen oder einer geringen Elementinteraktivität verstanden werden kann.

3.2.1 Intrinsische kognitive Belastung

Die intrinsische Belastung des Arbeitsgedächtnisses ist von der Interaktivität der zu verarbeitenden Elemente abhängig. Mit anderen Worten: Die

Zahl der gleichzeitig zu verarbeitenden und in Wechselwirkung stehenden Elemente beziehungsweise Schemata bedingen die intrinsische kognitive Belastung. Sollen beispielsweise chemische Symbole aus dem Periodensystem der Elemente auswendig gelernt werden, hängt die kognitive Belastung hauptsächlich von der Anzahl der zu lernenden Elemente ab. Die Anzahl allein sorgt jedoch nicht für eine hohe intrinsische kognitive Belastung. Begründet wird diese Tatsache damit, dass jedes einzelne chemische Elemente separat gelernt werden kann. Demnach kann das Symbol Ni für Nickel unabhängig von dem Symbol Zn für Zink oder Ti für Titan gelernt werden. Im Hinblick auf die intrinsische Belastung des Arbeitsgedächtnisses wird das Auswendiglernen der Symbole als einfach beziehungsweise leicht klassifiziert, da es sich hier um voneinander isolierte Fakten handelt. In diesem Beispiel sind die Elementinteraktivität und die intrinsische kognitive Belastung als gering einzustufen. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 259)

Elemente, die nicht miteinander interagieren, erleichtern das Lernen, weil sie nicht gleichzeitig verarbeitet werden müssen. Da die wenigen Elemente nur für kurze Zeit zwischengespeichert werden, wird das Arbeitsgedächtnis entlastet. Dagegen kann eine hohe Elementinteraktivität für eine hohe intrinsische kognitive Belastung verantwortlich sein, da die miteinander interagierenden Elemente nur verstanden werden können, wenn sie simultan im Arbeitsgedächtnis verarbeitet werden. Als Beispiel lässt sich das Lernen einer Fremdsprache anführen. Während das Lernen einzelner Vokabeln als eine Aufgabe mit geringer Elementinteraktivität angesehen werden kann, ist diese beim Lernen und Verstehen von grammatikalischen Satzkonstruktionen als hoch einzustufen. Werden die einzelnen voneinander isolierten Wörter gelernt, können der Sinn des Satzes sowie der grammatikalische Aufbau nicht erfasst werden. Demnach stehen die Wörter in einem sinnvollen Zusammenhang und interagieren stark miteinander. Es kann also nur dann auf den Sinn eines Satzes geschlossen werden, wenn alle Wörter betrachtet werden. Die hohe Elementinteraktivität liegt in der simultanen Verarbeitung aller Elemente aus dem Satz im Arbeitsgedächtnis begründet. Eine entsprechende hohe intrinsische kognitive Belastung kann die Folge sein. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 260; Wellenreuther 2010a, S. 89)

Mathematische Aufgaben weisen ebenfalls meist eine hohe Elementinteraktivität auf. Soll ein Schüler beispielsweise aus der Gleichung $x = y/z$ den Nenner ausmultiplizieren, muss er mehrere Zwischenschritte simul-

tan verarbeiten: Zum einen muss dem Schüler klar sein, dass er beide Seiten der Gleichung mit z zu multiplizieren hat und zum anderen muss er erkennen, dass auf der rechten Seite des Terms $z/z = 1$ ist, sodass als endgültige Lösung $x \cdot z = y$ stehen bleibt. Würde in diesem Beispiel lediglich der Fokus auf der rechten Seite der Gleichung liegen, wäre die Elementinteraktivität zwar gering, aber ebenso würde diese Vorgehensweise nicht zu einem mathematischen Verständnis beitragen. Schüler, die noch kein Schema zum Lösen mathematischer Gleichungen dieser Art ausgebildet haben, merken sich meistens nur, dass das z auf der rechten Seite der Gleichung verschwindet und auf der linken Seite wieder angehängt wird, sodass der Term $x \cdot z$ entsteht. Wie aber, rein mathematisch gesehen, aus dem Quotienten ein Faktor wird, bleibt ungeachtet. Durch dieses Vorgehen wird die intrinsische kognitive Belastung auf Kosten des mathematischen Verständnisses verringert. (Vgl. ebd.)

In Zusammenhang mit einer hohen Elementinteraktivität ist besonders der Prozess des Verstehens von zentraler Bedeutung, da von Verständnis hauptsächlich dann gesprochen wird, wenn die Elementinteraktivität hoch ist. Beispielsweise geht es beim Lernen von Fremdsprachenvokabeln, die kaum miteinander interagieren, weniger um den Verstehensprozess. Übersetzt ein Schüler eine Vokabel falsch, ist dies auf ein fehlerhaftes Lernen zurückzuführen und nicht auf ein fehlerhaftes Verständnis. Im Gegensatz dazu kann ein Schüler, der die bereits genannte mathematische Aufgabe mit hoher Elementinteraktivität $x = y/z$ mit dem Term $x \cdot z = y/z$ löst, die einzelnen Zwischenschritte nicht korrekt abrufen. Dadurch wird deutlich, dass dieser Schüler die Vorgehensweise nicht verstanden hat. Erst wenn ein Schüler die einzelnen Zwischenschritte beim Ausmultiplizieren des Nenners gelernt und verstanden hat, kann er Aufgaben dieser Art problemlos lösen. Demnach ist von zentraler Bedeutung, dass Verständnis nur dann auftreten kann, wenn das Arbeitsgedächtnis in der Lage ist, miteinander interagierende Elemente simultan zu verarbeiten. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 260f.) In diesem Zusammenhang kann eine Verbindung zur intrinsischen kognitiven Belastung gezogen werden. Die intrinsische kognitive Belastung steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Elementinteraktivität. Demnach ist die intrinsische kognitive Belastung umso höher, desto mehr miteinander interagierende Elemente simultan im Arbeitsgedächtnis verarbeitet werden müssen, damit eine Aufgabe gelöst werden kann. Bei dem gleichen Ausmaß der Elementinter-

aktivität kann die intrinsische kognitive Belastung durch ein Verstehen der Inhalte reduziert werden. Verstandene Prozeduren werden als Schema gespeichert und reduzieren damit die Zahl der simultan zu verarbeitenden Inhalte. Daraus lässt sich ableiten, dass die intrinsische kognitive Belastung einerseits proportional mit der Elementinteraktivität zusammenhängt und andererseits als expertiseabhängig angesehen werden kann. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 260f.)

Die einzelnen Schritte beim Ausmultiplizieren eines Nenners werden gemeinsam in Form eines Schemas gespeichert. Als Voraussetzung für die Konstruktion eines Schemas, das sich durch eine hohe Elementinteraktivität auszeichnet, gilt das Verstehen dieser Prozedur. Insofern die Vorgehensweise verstanden und das Schema konstruiert sowie automatisiert wurde, kann von einer vorhandenen Expertise für dieses mathematische Teilgebiet gesprochen werden. Dieses Schema kann wiederum eingebunden sein in ein Algebra-Schema-Netzwerk. Die in ein konstruiertes und automatisiertes Schema eingebundenen Elemente werden nicht mehr als einzelne Elemente im Arbeitsgedächtnis verarbeitet. Dadurch wird einerseits die Elementinteraktivität und andererseits die intrinsische kognitive Belastung erheblich reduziert. Eine hohe Expertise führt demnach zur Verringerung der intrinsischen kognitiven Belastung. Aus diesem Grund ist es für die Konzeption von Lernumgebungen und die Gestaltung zugehöriger Lernmaterialien von zentraler Bedeutung, den Leistungsstand der Schüler zu kennen. Nur so kann über das Maß der Elementinteraktivität entschieden werden, um die Schüler optimal zu fördern und eine intrinsische kognitive Überlastung zu verhindern. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 261f.)

Abschließend lässt sich festhalten, dass die intrinsische kognitive Belastung einerseits auf die Elementinteraktivität und die Aufgabenschwierigkeit und andererseits auf die Lernvoraussetzungen und damit auf die Expertise der Schüler zurückzuführen ist. Aus diesem Grund wird sie zum einen als **von außen festgelegte intrinsische kognitive Belastung** bezeichnet und bezieht sich in diesem Fall auf die „Belastung[, die] sich aufgrund der Komplexität des Lernmaterials [ergibt] (Elementinteraktivität [...]“ (Rey 2009, S. 42). Und zum anderen kann sie als **von innen festgelegte intrinsische kognitive Belastung** bezeichnet werden, die sich auf „[die] Verfügbarkeit kognitiver Schemata bei Lernenden“ (ebd.) bezieht.

Um ein Lernen zu ermöglichen, muss die Aufgabenschwierigkeit in Abhängigkeit von der Expertise der Lernenden gewählt werden. Die Schüler dürfen durch die Lernmaterialien weder über- noch unterfordert werden. Aus diesem Grund beziehen Schnotz & Kürschner (2007) den Zusammenhang zwischen der Expertise (der von innen festgelegten intrinsischen kognitiven Belastung) und der Aufgabenschwierigkeit (der von außen festgelegten intrinsischen kognitiven Belastung) auf die *Zone der nächsten Entwicklung*. Dabei greifen sie die Überlegungen Wygotzkis auf, der für die Zone der nächsten Entwicklung eines Kindes die Differenz zwischen dem aktuellen und dem potentiellen Entwicklungsstand betrachtet. Ein Schüler kann nur dann optimal gefördert werden, wenn er sich mit Aufgaben beschäftigt, die über sein Vorwissen hinausgehen, ihn aber durch fehlendes Vorwissen nicht überfordern. Diese Aufgaben beziehen sich auf die Zone der nächsten Entwicklung. (Vgl. Schnotz & Kürschner 2007, S. 486f.; Rey 2009, S. 116f.) Folgende Abbildung 3.3 zeigt den postulierten Zusammenhang:

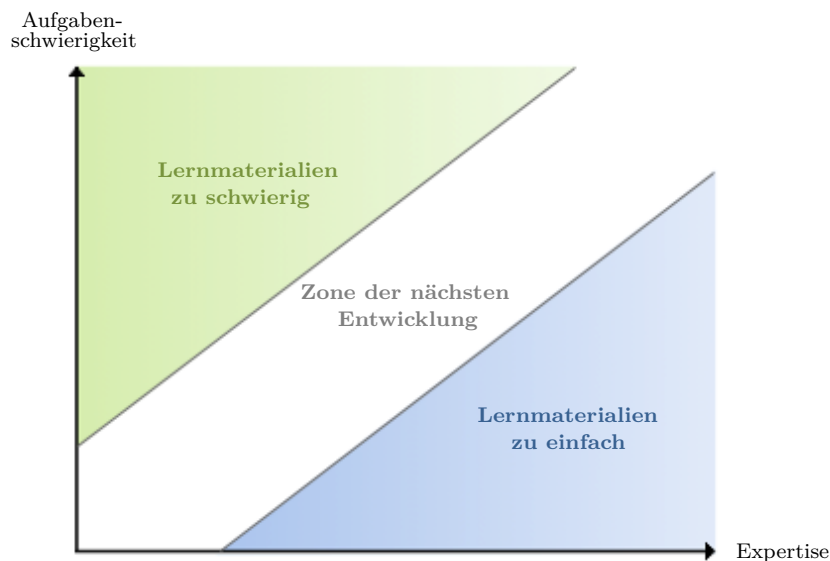


Abbildung 3.3: Die Zone der nächsten Entwicklung in Zusammenhang mit der Aufgabenschwierigkeit und der Expertise.²³

Die Aufgabenschwierigkeit sollte in Abhängigkeit von der Expertise gewählt werden. Sind das Vorwissen der Lernenden als hoch und die Aufgabenschwierigkeit als gering einzustufen, sind die Lernmaterialien für die Schüler zu einfach und eine Unterforderung kann die Folge sein. Hingegen sind die Lernmaterialien zu schwierig, wenn die Lernenden über kein Vor-

²³Abbildung aus Rey 2009, S. 116 und Schnotz & Kürschner 2007, S. 486.

wissen verfügen und die Aufgabenschwierigkeit als hoch einzustufen ist, woraus eine Überforderung resultiert. In beiden Fällen kann kein Lernen stattfinden, weil die Lernenden kognitiv überlastet oder aber unterfordert sind und kein Wissenszuwachs erfolgen kann. Nur wenn die Aufgabenschwierigkeit so gewählt wird, dass die Schüler entsprechend ihres Leistungsstandes gefördert werden, um den nächsten Entwicklungsstand zu erreichen, kann Lernen stattfinden. In Abbildung 3.3 findet sich dies in der Zone der nächsten Entwicklung wieder. Demnach kann die Aufgabenschwierigkeit proportional zur wachsenden Expertise der Lernenden steigen. (Vgl. Rey 2009, S. 116f; Schnotz & Kürschner 2007, S. 486ff.)

Generell gilt für die intrinsische kognitive Belastung, dass sie sich nicht durch die äußere Gestaltung der Lernmaterialien beeinflussen lässt. Lediglich die Elementinteraktivität lässt sich durch die Isolation einzelner Sequenzen steuern. Im Gegensatz dazu hat die instruktionale Gestaltung von Lernmaterialien Einfluss auf die extrinsische sowie die lernrelevante kognitive Belastung. (Vgl. ebd.; Niegemann et al. 2008, S. 46) Die Steuerung der kognitiven Belastung und der Elementinteraktivität wird geklärt, nachdem die extrinsische und die lernrelevante kognitive Belastung erläutert wurden.

3.2.2 Extrinsische kognitive Belastung

Die extrinsische kognitive Belastung ist abhängig von der Präsentation der fachlichen Inhalte. Im Schulunterricht ist es üblich, Informationen nicht nur textlich, sondern auch grafisch darzustellen. Jedoch werden diese Texte und Bilder oder Diagramme, die sich inhaltlich aufeinander beziehen, oftmals räumlich oder auch zeitlich getrennt voneinander präsentiert. Die Schüler müssen die Informationen aus der Textquelle in die Informationen aus der grafischen Quelle integrieren. Eine hohe extrinsische kognitive Belastung kann hier die Folge sein, da die Integration der Informationen mental abläuft. Da die kognitive Belastung hauptsächlich von der formalen äußeren Präsentation der Inhalte beeinflusst wird, handelt es sich in diesem Beispiel um eine extrinsische kognitive Belastung. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 263)

Im Schulunterricht kann eine weitere typische Vorgehensweise zu einer Erhöhung der extrinsischen kognitiven Belastung führen: Angenommen eine Schulklasse wird an ein neues Thema im Fach Mathematik herangeführt. Nach einem kurzen theoretischen Input werden den Schülern oft ein

oder zwei Lösungsbeispiele präsentiert. Darauf aufbauend sollen die Lernenden eigenständig eine lange Reihe konventioneller Aufgaben lösen, in denen der Problem- und zumeist auch der Zielzustand gegeben sind. Die meisten Lernprozesse und damit die Konstruktion und Automatisierung von Schemata finden hauptsächlich in der Phase der Aufgabenbearbeitung statt. Problematisch ist dabei aber, dass innerhalb dieses Prozesses die extrinsische kognitive Belastung sehr hoch ist und aufgrund dessen vorwiegend die gewissenhaften Schüler Lernprozesse vollziehen. Im Folgenden soll geklärt werden, warum die extrinsische kognitive Belastung in diesem Beispiel hoch ist. Dafür kann wieder das Ausmultiplizieren des Nenners in dem Term $x = y/z$ angeführt werden. Die Schüler sehen in diesem Fall den Problemzustand und kennen bestenfalls aus einem Lösungsbeispiel auch den Zielzustand $\dots = y$, jedoch besitzen sie noch kein ausgebildetes und automatisiertes Schema, um diese Aufgabe zu lösen. Sie müssen also nach einem mathematischen Operator suchen, um zu einer passenden Lösung zu kommen. Dabei muss jedes Zwischenziel des Lösungsweges gespeichert werden, wodurch die kognitive Belastung erhöht wird. Diese Vorgehensweise gleicht eher dem Suchen nach einer passenden Lösungsstrategie als einem geleiteten Lernprozess beziehungsweise wird ein Lernprozess durch die hohe kognitive Belastung während des Suchens nach einer Lösung verhindert. In diesem Beispiel ist nicht nur die extrinsische kognitive Belastung als hoch zu bezeichnen, sondern ebenfalls die intrinsische, da noch keine Schemata zum Lösen dieser Gleichung ausgebildet sind und die Elementinteraktivität dieser Aufgabe ebenfalls hoch ist. Hinzu kommt, dass die Lernenden beim Aufbau des passenden Schemas allein gelassen werden, da sie keine zusätzliche Unterstützung beim Lösen der Aufgabe erhalten. Somit addiert sich die extrinsische kognitive Belastung zur intrinsischen hinzu. Wenn beide Belastungsformen hoch sind, kann es zu einer kognitiven Überlastung kommen, wodurch ein Lernen verhindert wird. Es gilt also abzuwägen, wie hoch die intrinsische kognitive Belastung ist und dementsprechend die extrinsische kognitive Belastung, die durch die formale äußere Gestaltung beeinflusst werden kann, zu verringern. Durch eine Verringerung der extrinsischen kognitiven Belastung sind mehr freie Kapazitäten vorhanden, damit die Inhalte verstanden und gespeichert werden können. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 262ff.) Das Stattfinden von Lernprozessen korreliert mit einer hohen lernrelevanten kognitiven Belastung, die im Folgenden im Fokus steht.

3.2.3 Lernrelevante kognitive Belastung

Die lernrelevante kognitive Belastung steigt im Lernprozess bei der Konstruktion relevanter Schemata an. Das Arbeitsgedächtnis der Schüler sollte demnach nicht unnötig extrinsisch belastet werden. Es gilt also, die Aufmerksamkeit der Lernenden auf die lernrelevanten Aspekte zu lenken, um die Konstruktion von Schemata zu fördern. Jedoch ist es nicht immer ausreichend, die extrinsische kognitive Belastung gering zu halten und gleichzeitig einen Anstieg der lernrelevanten kognitiven Belastung zu erwarten. Beispielsweise ist die extrinsische kognitive Belastung für Lernende beim Nachvollziehen von Lösungsbeispielen als gering einzustufen. Problematisch dabei ist, dass die Schüler die Beispiele oftmals nur überfliegen und damit auch die lernrelevante kognitive Belastung gering ist, da die einzelnen Schritte im Lösungsbeispiel nicht verstanden werden. Abhilfe könnten hier weitere instruktionale Gestaltungen im Lernmaterial schaffen. So kann ein Lösungsbeispiel, in das der Schüler die Zwischenschritte selbst eintragen muss, zu einer tieferen Verarbeitung und somit zu einer höheren lernrelevanten kognitiven Belastung führen. Aus diesem Grund ist die lernrelevante kognitive Belastung ebenfalls abhängig von der Präsentation der Inhalte. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 264f.)

Die drei Belastungsformen hängen stark miteinander zusammen. Dies ist einer der Gründe, warum die strikte Trennung oftmals kritisiert wird (vgl. Rey 2009, S. 44). Wichtig dabei ist, dass die Summe der drei Belastungsformen nicht die Kapazitätsbegrenzung des Arbeitsgedächtnisses überschreitet (vgl. Sweller et al. 1998, S. 264). Für die Gestaltung von Lernmaterialien gilt es demnach zu entscheiden, wie hoch die kognitive Belastung durch das Bearbeiten des Materials ist und ob Gestaltungsmaßnahmen zur Verringerung der kognitiven Belastung zum Einsatz kommen sollten. Juhani E. Tuovinen schlägt in einem Flussdiagramm eine Vorgehensweise vor, mit der geklärt wird, ob die Prinzipien zur Gestaltung von Lernmaterialien aus der Cognitive Load Theorie angewendet werden sollten (vgl. Tuovinen 2000, S. 239; vgl. auch Rey 2009, S. 43). Das in der folgenden Abbildung 3.4 dargestellte Flussdiagramm dient zunächst dem Feststellen der kognitiven Belastung. Daraus wird abgeleitet, ob die Gestaltungsmaßnahmen der Cognitive Load Theorie bei der Konzeption und

Überarbeitung der Lernmaterialien berücksichtigt werden sollten (vgl. Touvinen 2000, S. 238f.; Rey 2009, S. 42f.; Sweller et al. 1998, S. 265)²⁴:

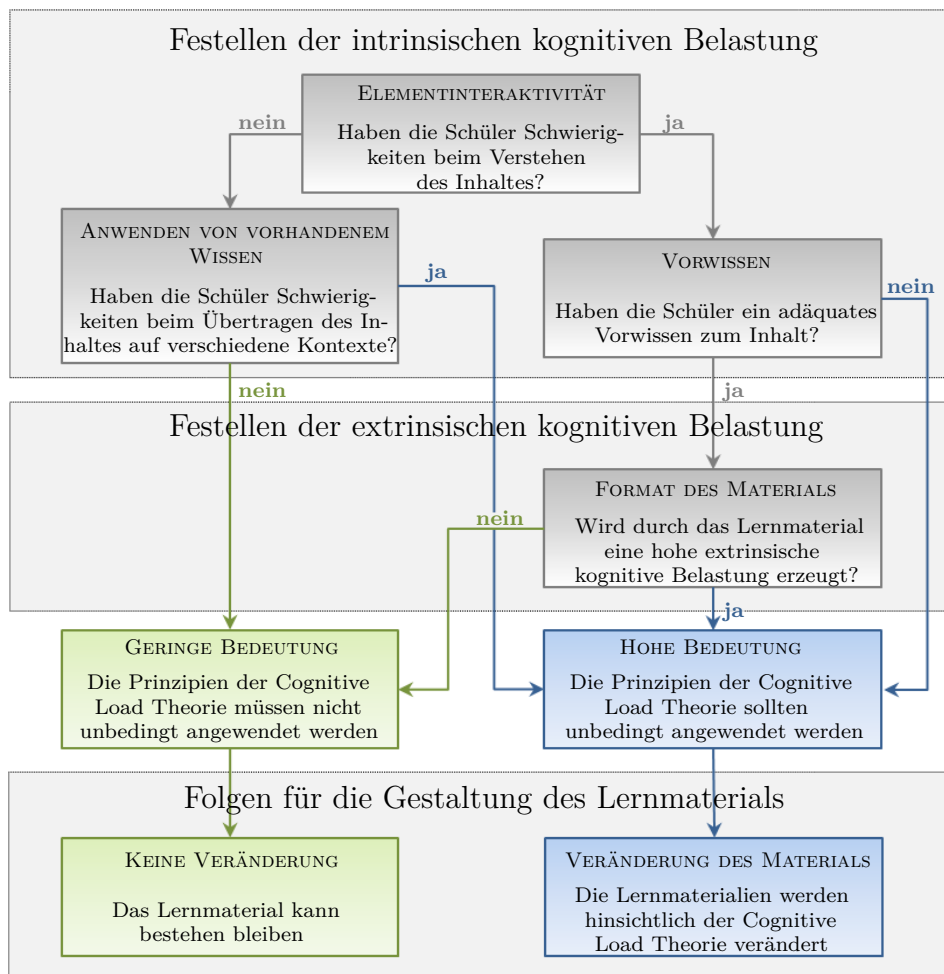


Abbildung 3.4: Flussdiagramm – Wann ist die Anwendung der Gestaltungsmaßnahmen der Cognitive Load Theorie erforderlich?²⁵

Zunächst sollte die intrinsische kognitive Belastung durch das Lernmaterial festgestellt werden. Wenn ein Schüler keine Schwierigkeiten beim Verstehen des Inhaltes und bei dessen Übertragung auf verschiedene Kontexte hat, kann die intrinsische kognitive Belastung als gering eingestuft werden. Infolgedessen wird der Anwendung der Gestaltungsmaßnahmen nur eine geringe Bedeutung beigemessen. Dementsprechend müssen die Lernmaterialien nicht zwangsläufig verändert werden. Für den Fall, dass ein Schüler zwar keine Schwierigkeiten beim Verstehen des Inhaltes hat,

²⁴ Das Flussdiagramm wurde nie selbst von Sweller aufgestellt. Dennoch hat er die Vorgehensweise beschrieben. Aus diesem Grund wurde das Flussdiagramm hinsichtlich der Aussagen Swellers verändert.

²⁵ Abbildung modifiziert aus Tuovinen 2000, S. 239 und Rey 2009, S. 43.

diesen aber nicht auf andere Kontexte transferieren kann, scheint die intrinsische kognitive Belastung höher zu sein und demnach sollte eine Modifizierung der Lernmaterialien stattfinden.

Stellt sich hingegen heraus, dass ein Schüler Schwierigkeiten beim Verstehen des Inhaltes hat, muss in einem nächsten Schritt geklärt werden, ob er ein zum Thema passendes Vorwissen besitzt. Wird auch dies negiert, ist die intrinsische kognitive Belastung als sehr hoch einzustufen und die Gestaltungsmaßnahmen der Cognitive Load Theorie müssen unbedingt angewendet werden, damit der Schüler nicht noch zusätzlich extrinsisch kognitiv belastet wird. Ist der Schüler jedoch im Besitz eines adäquaten Vorwissens, gilt es zu klären, ob durch das Format des Materials eine hohe extrinsische kognitive Belastung erzeugt wird. Ist dies der Fall, wird deutlich, dass die Schwierigkeiten beim Verstehen des Inhaltes in der hohen extrinsischen kognitiven Belastung begründet liegen. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass das Lernmaterial unbedingt überarbeitet werden muss. Stellt sich allerdings heraus, dass die extrinsische kognitive Belastung durch das Material nicht erhöht wird, liegen die Verständnisschwierigkeiten in anderen Faktoren begründet und die Lernmaterialien müssen nicht notwendigerweise modifiziert werden.

Im Folgenden steht im Vordergrund, durch welche Gestaltungsmaßnahmen insbesondere die extrinsische kognitive Belastung verringert werden kann, um genügend freie Kapazitäten für eine hohe lernrelevante kognitive Belastung zu schaffen.

3.3 Gestaltungsmaßnahmen zur Steuerung der kognitiven Belastung

Die kognitive Belastung leitet sich aus der Informationsmenge ab, die beim Bearbeiten von Lernmaterialien simultan im Arbeitsgedächtnis zwischengespeichert werden muss. Übersteigt diese Menge an Informationen die begrenzte Speicherkapazität des Arbeitsgedächtnisses, kann eine kognitive Überlastung die Folge sein. Das Stattfinden weiterer Lernprozesse wird dadurch verhindert. Im Sinne der Cognitive Load Theorie wird demnach die kognitive Belastung als die Belastung auf das kognitive System beim Bearbeiten einer Aufgabe zusammengefasst. Wie zuvor dargestellt, ist die kognitive Belastung als die Summe der intrinsischen, der extrinsischen und der lernrelevanten kognitiven Belastung zu verstehen. Wenn

es darum gehen soll, die kognitive Belastung eines Schüler festzustellen, lassen sich zwei Dimensionen unterscheiden, die in einer starken Wechselbeziehung zueinander stehen und sich auf die Leistung des Schülers auswirken: Zum einen muss die mentale Belastung betrachtet werden, die sich auf die Beschaffenheit des Lernmaterials mit der erzeugten intrinsischen und extrinsischen kognitiven Belastung bezieht. Diese Dimension basiert auf dem Lernmaterial an sich. Zum anderen ist die mentale Leistung des Schülers beim Bearbeiten des Lernmaterials zu nennen. Diese Dimension basiert auf dem Schüler und dessen Anstrengung. Das Lösen einer Aufgabe wird mit der Leistung des Schülers gleichgesetzt. Ein Anstieg der mentalen Belastung kann durch einen Schüler ausgeglichen werden, wenn seine mentale Anstrengung ebenfalls ansteigt, sodass er in der Lage ist eine Aufgabe zu lösen. Damit ist das Lösen einer Aufgabe nicht nur abhängig von der mentalen Belastung, sondern auch von dem Bemühen eines Schülers. (Vgl. Sweller 1998, S. 266)

Wie mehrfach erwähnt, kann auf die kognitive Belastung durch das Anwenden von Gestaltungsmaßnahmen Einfluss genommen werden, wobei besonders die extrinsische kognitive Belastung verringert werden soll. Im Folgenden werden diese zwölf Maßnahmen ausführlich vorgestellt.

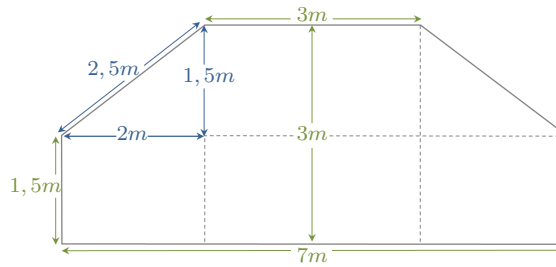
3.3.1 Zielfreiheitseffekt

Der Effekt der Zielfreiheit bezieht sich hauptsächlich auf die Aufgabenkonzeption. Angenommen, für den Mathematikunterricht soll folgende Aufgabe zur Geometrie gelöst werden:

Die Wand im Obergeschoss eines Hauses hat eine Grundseite mit einer Länge von 7m. Ab einer Höhe von 1,5m beginnen die Dachschrägen. Die obere Seite der Wand ist 3m lang. Die Zimmerdecke befindet sich in einer Höhe von 3m. Wie groß sind die Fläche und der Umfang der Wand?

Diese Aufgabe beinhaltet ein festgesetztes Ziel. Die Schüler erkennen aus der Aufgabenstellung, dass sie die Fläche und den Umfang der Wand berechnen sollen. Das Vorgehen der Schüler beginnt beim Ziel der Aufgabe. Dazu analysieren sie die Unterschiede zwischen dem Ziel und den gegebenen Größen. Eine Skizze der Wand kann als ein erstes Zwischenziel

betrachtet werden. Von dieser Skizze ausgehend können die Schüler die große Fläche in Teilflächen zerlegen, was als ein weiteres Zwischenziel angesehen werden kann. Darüber hinaus müssen die Schüler erkennen, welche Seiten gegeben sind und welche Seiten sie noch bestimmen müssen. In der dargestellten Skizze der Wandfläche sind die gegebenen Größen grün gekennzeichnet und die noch zu bestimmenden Größen blau. Außerdem sind die Teilflächen kenntlich gemacht. Mittels dieser Skizze können die Schüler erkennen, dass es sich bei der Gesamtfläche um eine zusammengesetzte Fläche aus beispielsweise einem Rechteck und einem Pyramidenstumpf handelt. Als Voraussetzung für das Berechnen der Gesamtfläche kann das Vorhandensein eines Rechenschemas für Rechtecke angesehen werden. Diese Aufgabe kann demnach auch dann gelöst werden, wenn die Schüler den Begriff Pyramidenstumpf nicht kennen oder die Fläche eines Dreiecks nicht berechnen können. Die Lernenden müssten an dieser Stelle die Fläche des unteren Rechtecks berechnen ($A_1 = 7m \cdot 1,5m = 10,5m^2$) sowie die Fläche des Pyramidenstumpfes beziehungsweise – insofern eines der Dreiecke verschoben wird – des oberen Rechtecks ($A_2 = 5m \cdot 1,5m = 7,5m^2$). So ergibt sich eine Gesamtfläche von $A_{ges} = 18m^2$, womit das erste Teilziel erreicht ist.



Für den Umfang der Wandfläche müssen die Schüler zunächst die Länge der Dachschrägen berechnen. Dazu müssen sie über ein Rechenschema für die Seitenlängen von Dreiecken verfügen und den Satz des Pythagoras anwenden können. Außerdem müssen die Grundseite und die Höhe des Dreiecks erschlossen werden. Sofern diese Voraussetzungen erfüllt sind, werden die Schüler die Länge der Dachschrägen und daran anknüpfend den Umfang der Wandfläche ($u = 18m$) berechnen können, womit das zweite Teilziel der Aufgabe erfüllt ist.

Dieses Vorgehen erscheint aus dem üblichen Schulunterricht altbekannt. Die extrinsische kognitive Belastung für die Schüler kann beim Bearbeiten dieser Aufgabe sehr hoch sein. Dies liegt in der Speicherung mehrerer Zwischenergebnisse begründet. Die Schüler arbeiten hier nicht von dem Problemzustand ausgehend, sondern starten beim Ziel und arbeiten demnach rückwärts. Die einzelnen Zwischenziele bauen aufeinander

der auf und reduzieren die Differenz zwischen dem Ausgangszustand und dem Ziel. Dadurch wird viel Speicherkapazität im Arbeitsgedächtnis benötigt, was die Konstruktion von Schemata verhindern kann, da nicht genügend freie Kapazitäten für diese Lernprozesse vorhanden sind. Bei diesem Vorgehen handelt es sich vielmehr um die Überprüfung der genannten Schemata. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 270f.; Rey 2009, S. 112)

Im Sinne des Zielfreiheitseffektes wird vorgeschlagen, Aufgaben ohne ein festgesetztes Ziel zu formulieren. Für die Beispielaufgabe könnte eine Zielfreiheit geschaffen werden, indem die Frage „*Wie groß sind die Fläche und der Umfang der Wand?*“ durch „*Berechne so viele Komponenten wie du kannst*“ ersetzt wird. Dadurch haben die Schüler die Möglichkeit, die Struktur des Ausgangszustandes zu erfassen und darauf aufbauend schrittweise die Fläche und den Umfang zu berechnen. Im Gegensatz zu einer Aufgabe mit festem Ziel, bei der die Schüler eher eine Mittel-Zweck-Analyse durchführen, kann das Generieren einzelner Schritte bei einer zielfreien Aufgabe als eine Lernstrategie angesehen werden. Mit der zielfreien Variante der genannten Aufgabe müssen die Lernenden passende Operatoren finden, um einzelne Komponenten berechnen zu können. Aus jedem gefundenen Operator ergibt sich ein neuer Problemzustand, der gelöst werden kann. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 271ff.; Rey 2009, S. 112) So kann die Skizze zu Beginn helfen, die Seiten ausfindig zu machen, die noch nicht gegeben sind. Darauf aufbauend können Teilflächen, die Gesamtfläche und der Umfang berechnet werden.

Letztendlich vollziehen die Schüler mit dieser zielfreien Variante die gleichen Rechenoperationen wie beim Lösen der Aufgabe mit festgesetztem Ziel. Sie gelangen bei beiden Aufgabenvarianten zum selben Endergebnis, jedoch unterscheidet sich das Vorgehen der Schüler besonders hinsichtlich der Problemlösestrategie und der kognitiven Prozesse. Ist in der Aufgabe ein Ziel festgelegt, müssen die Lernenden den Ausgangszustand, das Ziel, die Beziehungen zwischen der Ausgangslage und dem Ziel, passende Rechenoperatoren und die Zwischenziele im Arbeitsgedächtnis behalten. Ohne ein festgelegtes Ziel in der Aufgabenstellung werden sukzessive die Rechenoperatoren entsprechend der Ausgangslage genutzt. Dadurch sind freie Kapazitäten im Arbeitsgedächtnis vorhanden, um Schemata zu konstruieren und zu automatisieren. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 272) Jedoch muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass sich der Ziel-

freiheitseffekt nicht auf jedes Fach und jede Aufgabe übertragen lässt (vgl. Sweller et al. 1998, S. 273).

3.3.2 Effekt vollständig ausgearbeiteter Lösungsbeispiele

Die Effektivität des zuvor beschriebenen Zielfreiheitseffektes liegt besonders darin begründet, dass die Schüler keine Mittel-Zweck-Analyse vollziehen, sondern den Problemzustand erkennen und davon ausgehend Lösungswege finden. Die gleiche Begründung lässt sich auf die Nutzung vollständig ausgearbeiteter Lösungsbeispiele übertragen. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 273) Ein vollständig ausgearbeitetes Lösungsbeispiel besteht zunächst aus einer ausformulierten Problemstellung. Danach folgen einzelne Lösungsschritte und schlussendlich die Antwort auf die Problemstellung. (Vgl. Rey 2009, S. 108; Renkl et al. 2003, S. 94; Große 2005, S. 19) Häufig tauchen Lösungsbeispiele in Schulbüchern auf, um die Anwendung eines zuvor beschriebenen Prinzips zu demonstrieren. In Mathematik- oder Physikschulbüchern stehen vollständig ausgearbeitete Lösungsbeispiele oftmals nach der Einführung in Gesetzmäßigkeiten oder Theoreme. (Vgl. Renkl et al. 2003, S. 94) Die Erstellung von Lösungsbeispielen eignet sich besonders in naturwissenschaftlichen Fächern, da sich die Lösungswege meist gut strukturieren lassen und dadurch einzelne Lösungsschritte dargestellt werden können. Daraus lässt sich ableiten, dass sich Lösungsbeispiele hauptsächlich für Aufgaben anbieten, die nur eine Lösung zulassen. Für Aufgaben, in denen die Schüler beispielsweise über ein spannendes Erlebnis berichten oder eine Fantasiegeschichte erzählen sollen, eignen sich vollständig ausgearbeitete Lösungsbeispiele weniger. (Vgl. Große 2005, S. 19)

Durch den Einsatz vollständig ausgearbeiteter Lösungsbeispiele kann das Arbeitsgedächtnisses entlastet werden. Besonders im Vergleich zum Bearbeiten konventioneller Problemlöseaufgaben stellt sich heraus, dass das Problemverständnis der Schüler nachhaltiger unterstützt wird, wenn die Lernenden mit vollständig ausgearbeiteten Lösungsbeispielen an die Lösungen herangeführt werden, als wenn sie eigenständig ein Problem lösen sollen. Daneben ist die Suche nach einer Lösung besonders zur Einführung von Prinzipien selten zielführend. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 273; Renkl et al. 2003, S. 94; Niegemann et al. 2008, S. 47). Mithilfe von vollständig ausgearbeiteten Lösungsbeispielen können sich die Schüler auf die

Lösungsschritte konzentrieren und haben freie Kapazitäten, um Schemata zu konstruieren (vgl. Niegemann et al. 2008, S. 47). Erstmals empirisch belegt wurde die Effektivität von Lösungsbeispielen in Zusammenhang mit den Überlegungen zur Cognitive Load Theorie durch Renkl et al. (2003). Einerseits konnte hier nachgewiesen werden, dass der Lerneffekt durch Lösungsbeispiele im Vergleich zu konventionellen Problemlöseaufgaben erheblich größer ist und andererseits, dass dieser höhere Lerneffekt in einer geringeren extrinsischen kognitiven Belastung begründet liegt. Durch die extrinsische Entlastung des Arbeitsgedächtnisses sind mehr freie Kapazitäten vorhanden, die durch die lernrelevante kognitive Belastung und damit zur Konstruktion von Schemata genutzt werden können. (Vgl. Renkl et al. 2003, S. 96ff.)

Bei der Konstruktion von Schemata geht es darum, Lösungsstrategien zu verinnerlichen und das eigenständige Problemlösen zu erlernen. Wenn die Schüler Probleme bearbeiten, ist es von zentraler Bedeutung, dass sie die richtigen Lösungsschritte wählen. Dabei können Lösungsbeispiele helfen, indem beispielsweise Rechenoperatoren vorgegeben werden. Außerdem kann ein Lernen mit Lösungsbeispielen zu einer Vertrautheit mit der Formulierung von Problemstellungen führen. Dadurch kann einer Fehlinterpretation der Aufgabenstellung vorgebeugt werden. (Vgl. Große 2005, S. 20)

Der Einsatz vollständig ausgearbeiteter Lösungsbeispiele ist besonders dann sinnvoll, wenn die Lernenden noch kein Vorwissen zu der behandelten Thematik besitzen. In diesem Fall benötigen die Schüler so viele freie Kapazitäten wie möglich, um ein passendes Schema zu konstruieren.²⁶ Wenn es um die Automatisierung dieses Schemas geht, sind vollständig ausgearbeitete Lösungsbeispiele weniger sinnvoll. Um ein Schema zu automatisieren, sollten die Schüler konventionelle Aufgaben lösen, die dem Lösungsbeispiel ähneln. (Vgl. ebd.)

Wenn Schüler mit vollständig ausgearbeiteten Lösungsbeispielen sukzessive an das selbständige Lösen von Problemen herangeführt werden sollen, muss darauf geachtet werden, dass die Schüler die Lösungsbeispiele ausreichend analysieren. So ist es in der Praxis nicht unüblich, dass

²⁶ Dies ist einer der Gründe, warum die Effektivität von Lösungsbeispielen von Renkl et al. (2003) nachgewiesen werden konnte. Inhaltlich ging es bei den Lösungsbeispielen in dieser Studie um Wahrscheinlichkeitsrechnung und die Stichprobe setzte sich aus 80 Studierenden zusammen, die kaum inhaltliches Vorwissen besaßen. (Vgl. Renkl et al. 2003, S. 96)

die Lernenden die Lösungsbeispiele nur oberflächlich betrachten. Es gibt bei vollständig ausgearbeiteten Lösungsbeispielen keinen Faktor, der auf ein erfolgreiches Bearbeiten des Beispiels schließen lässt. Dadurch kann es zu einer Verständnisillusion der Schüler kommen, da sie auch selbst nicht überprüfen können, ob sie das Beispiel komplett verstanden haben. (Vgl. Große 2005, S. 35; Wellenreuther 2011, S. 24) Bemerkbar macht sich diese Verständnisillusion meistens erst, wenn die Schüler die beispielhaft dargelegten Lösungsstrategien auf neue Probleme transferieren sollen. Dadurch zeigt sich, dass die Lernenden die Lösungsschritte nicht tiefgreifend verstanden haben. Aus diesem Grund hält Renkl (2005) fest, dass vollständig ausgearbeitete Lösungsbeispiele nicht per se funktionieren. Vielmehr müssen einige Faktoren bei der Planung und Gestaltung vollständig ausgearbeiteter Lösungsbeispiele berücksichtigt werden, damit diese den gewünschten Lernerfolg erzielen. (Vgl. Renkl 2005, S. 232) Die Effektivität von Lösungsbeispielen ist von drei Faktoren abhängig: Zunächst von den *intra-example features*, die sich auf die Gestaltung der einzelnen Lösungsbeispiele beziehen, und den *inter-example features*, die auf das Zusammenwirken mehrerer Beispiele im Unterricht eingehen. Darüber hinaus gibt es individuelle Unterschiede im Bearbeitungsprozess der Lernenden. Damit wird die Selbsterklärungsaktivität angesprochen, die sich darauf bezieht, wie ausführlich und tiefgreifend ein Schüler das Lösungsbeispiel analysiert. (Vgl. Atkinson, Derry, Renkl & Wortham 2000, S. 186) Im Folgenden wird die Selbsterklärungsaktivität näher erläutert, die beim Bearbeiten von Lösungsbeispielen gefördert werden sollte. Dabei stehen folgende zwei Kriterien für die Erklärung von Lösungsbeispielen im Vordergrund (vgl. Renkl 2005, S. 232ff.; siehe auch Rey 2009, S. 109ff. und Große 2005, S. 36ff.):

Die Förderung von Selbsterklärungen meint, dass die Lernenden die Lösungsbeispiele selbständig erklären sollen. Die Schüler werden dazu aufgefordert, die einzelnen Lösungsschritte zu explizieren. Renkl (2005) schlägt vier Herangehensweisen vor, um die Selbsterklärungsaktivität der Lernenden zu fördern:

- (1) Erklären der grundlegenden Prinzipien: Die Schüler sollen von den dargestellten Operatoren auf grundlegende Prinzipien schließen und diese verdeutlichen. Dadurch wird das Verständnis für einzelne Lösungsschritte und gesamte Lösungsmethoden gefördert.

- (2) Erklären der Zwischenziele: Die Lernenden sollen das Zustandekommen der Zwischenziele erklären, damit ihr Verständnis bezüglich der Bedeutung von Zwischenzielen gefördert wird. Durch das Nennen eines Zwischenziels kann das Arbeitsgedächtnis entlastet werden, da die Operatoren zu dessen Bestimmung nicht mehr zwischengespeichert werden müssen.
- (3) Vergleichen von Lösungsbeispielen: Werden Beispiele miteinander verglichen, können Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der Vorgehensweise herausgearbeitet werden. Wenn strukturgleiche Lösungsbeispiele miteinander verglichen werden, können die Schüler zum einen die irrelevanten oberflächlichen Merkmale aus der Aufgabenstellungen herausfiltern (z. B. Namen von Personen), sodass überflüssige Details das Arbeitsgedächtnis nicht mehr belasten, und zum anderen kann der Fokus auf die relevanten Strukturen der Lösungsbeispiele gelegt werden. Die Schüler können beispielsweise die oberflächlichen Merkmale als Unterschiede und die relevanten Strukturen als Gemeinsamkeiten herausstellen. Beim Vergleichen von Lösungsbeispielen, die den Umgang mit verschiedenen Problemen aus demselben Themenbereich zeigen, kommt hinzu, dass die Schüler unterschiedliche Lösungsstrategien herausfiltern können. Zudem werden sie auch hier nicht durch oberflächliche Strukturen abgelenkt.
- (4) Antizipation des nächsten Lösungsschrittes: Die Lernenden versuchen den nächsten Lösungsschritt vorauszusagen und kontrollieren sich, indem sie den Zwischenschritt nachschlagen. Dadurch können die Schüler zum einen das Schema zum Problemlösen festigen und zum anderen sich selbst beim Vorhersagen der einzelnen Schritte überprüfen und in Folge dessen Verständnisschwierigkeiten erkennen und beseitigen. Die Schüler können zur Antizipation des nächsten Lösungsschrittes angehalten werden, indem Lücken in die Lösungsbeispiele eingebaut werden, wobei es sich dann um unvollständig ausgearbeitete Lösungsbeispiele handelt.

Mithilfe der Selbsterklärungsaktivität kann einer passiven und oberflächlichen Bearbeitung von Lösungsbeispielen entgegen gewirkt werden, weil die Lernenden aktiv in die Erklärung einbezogen

werden. Dabei ist von zentraler Bedeutung, dass die Schüler an die genannten Methoden zum Umgang mit vollständig ausgearbeiteten Lösungsbeispielen erst herangeführt werden müssen.

Vorgegebene Erklärungen haben im Vergleich zu den Selbsterklärungen den Vorteil, dass sie immer korrekt sind. Nicht jeder Schüler kann immer die richtige Erklärung oder die richtige Zwischenschritt-Vorhersage treffen, sodass sich durch wiederholte fehlerhafte Selbsterklärungen lückenhafte Schemata bilden. Die vorgegebenen Erklärungen können die Selbsterklärungsaktivität der Schüler unterstützen. Wichtig bei der Gestaltung vorgegebener Erklärungen sind folgende Punkte:

- (1) Präsentation auf Wunsch des Lernenden: Die vorgegebenen Erklärungen sollten dem Schüler nur bei Bedarf bereitgestellt werden (beispielsweise bei fehlerhaftem Bearbeiten einer Aufgabe). Dadurch kann sichergestellt werden, dass die vorgegebene Erklärung zum passenden Zeitpunkt eingesetzt wird und zum weiteren Lernprozess beiträgt.
- (2) Auf das Wesentliche reduziert: Die vorgegebenen Erklärungen müssen so prägnant wie möglich gestaltet sein. Zu lange Erklärungen können redundante Informationen enthalten, die das Arbeitsgedächtnis unnötig belasten. Der Schüler soll durch die vorgegebene Erklärung schnellstmöglich an seiner Lösung weiterarbeiten können.
- (3) Auf die grundlegenden Prinzipien fokussieren: Äquivalent zum ‚Erklären der grundlegenden Prinzipien‘ in Zusammenhang mit der Förderung von Selbsterklärungen gilt auch für die vorgegebenen Erklärungen, dass der Fokus auf die grundlegenden Prinzipien gerichtet werden sollte.

Beim Bearbeiten von vollständig ausgearbeiteten Lösungsbeispielen muss gewährleistet werden, dass die Schüler die Lösungsbeispiele durch die Förderung von Selbsterklärungsaktivitäten analysieren. An adäquaten Stellen müssen passende Erklärungen für die Schüler bereitgestellt werden. Jedoch reicht eine treffende Bearbeitungsstrategie nicht aus, um einen positiven Effekt beim Lernen aus Lösungsbeispielen zu erzielen. Es kann vorkommen, dass das Beispiel selbst zur Erhöhung der kognitiven Belas-

tung führt. Dementsprechend soll im Folgenden der Fokus auf Kriterien einer adäquaten Gestaltung eines Lösungsbeispiels (intra-example features) gelegt werden bevor das Zusammenwirken mehrerer Beispiele miteinander (inter-example features) in den Vordergrund rückt (vgl. Renkl 2005, S. 235ff.; Atkinson et al. 2000, S. 186ff.; siehe auch Rey 2009, S. 109ff. und Große 2005, S. 36ff.):

Integration von Informationen: In Lösungsbeispielen, die aus textlichen und bildlichen Informationen (beispielsweise einer unterstützenden Skizze) bestehen, sollten die jeweiligen Informationen integriert werden. Die extrinsische kognitive Belastung kann bei Lernenden steigen, wenn sie selbst die einzelnen voneinander getrennt dargestellten Informationen zusammenfassen müssen. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, einzelne Lösungsschritte oder Erklärungen zu den Lösungsschritten direkt an die unterstützende Skizze zu schreiben.²⁷ Dadurch wird verhindert, dass der Schüler die zusammengehörigen Informationen suchen muss. Wenn beispielsweise im Mathematikunterricht ein Lösungsbeispiel zur Winkelberechnung von Dreiecken gegeben und dieses durch eine Skizze des Dreiecks unterstützt wird, sollten die Berechnungen der einzelnen Winkel in die Skizze integriert werden. Die parallele Darbietung der Informationen aus verschiedenen Quellen kann aber nicht nur auf Bild und Text, sondern auch auf Bild oder Text in Kombination mit Sprache bezogen werden. Demnach sollten sprachliche Informationen immer parallel zum nächsten Lösungsschritt gegeben werden.²⁸ Bei der Kombination von sprachlichen mit textlichen oder bildlichen Informationen kann die Aufmerksamkeit der Lernenden auf den aktuell beschriebenen Lösungsschritt fokussiert werden. Ansonsten könnten die Lernenden lange damit beschäftigt sein, den beschriebenen Lösungsschritt ausfindig zu machen. Insgesamt gilt es darauf zu achten, alle dargebotenen Informationen zu einem Element zusammenzufassen und gemeinsam zu präsentieren, um so die Bildung des Schemas zu unterstützen.

²⁷ Mit der Integration von auseinandergezogenen Informationen wird ein weiterer Effekt der Cognitive Load Theorie angesprochen: der Effekt der geteilten Aufmerksamkeit, der innerhalb dieses Kapitels ebenfalls ausführlich thematisiert wird.

²⁸ Damit wird der Modalitätseffekt der Cognitive Load Theorie angesprochen, der ebenfalls noch ausführlich dargestellt wird.

Fokussierung auf strukturelle Merkmale: Beim Arbeiten mit Lösungsbeispielen sollen die Schüler lernen, welche Merkmale aus dem Problemzustand ausschlaggebend für das Anwenden einer Lösungsstrategie sind. Sie sollen sich nicht durch oberflächliche Merkmale ablenken lassen, sondern die strukturellen und für das Lösen des Problems relevanten Merkmale erkennen. Der Einsatz strukturgleicher Lösungsbeispiele und der Vergleich dieser kann dazu beitragen, die relevanten Merkmale herauszufiltern. Um einen lernförderlichen Effekt beim Vergleich der Lösungsbeispiele zu erzielen, müssen die Schüler dazu aufgefordert werden, nach Gemeinsamkeiten und Unterschieden zu suchen.

Bildung von Lösungsschritt-Blöcken: Besonders wenn Lösungsbeispiele neue Strategien oder den Transfer von bekannten Lösungsstrategien auf andere Kontexte beinhalten, kann die Bildung von Lösungsschritt-Blöcken hilfreich sein. Wenn bereits bekannte Strategien in einem Block dargestellt und mit einem Zwischenziel abgeschlossen werden, können die Schüler die nachfolgenden neuen Informationen einfacher mit ihrem Vorwissen verknüpfen. Durch das Aufzeigen von Zwischenzielen können die Lösungsbeispiele sukzessive dargestellt werden und den Lernenden fällt es leichter, die Lösung nachzuvollziehen. Darüber hinaus kann das Arbeitsgedächtnis entlastet werden, da die einzelnen Ziele nicht zwischengespeichert werden müssen, sondern bereits visualisiert sind. Außerdem haben die Schüler dadurch die Möglichkeit festzustellen, bei welchem Abschnitt des Lösungsbeispiels Verständnisschwierigkeiten ihrerseits auftreten und somit wird ihre Selbsterklärungsaktivität gefördert. Visuell kann das Umrahmen der Lösungsschritt-Blöcke unterstützend sein. Durch das Aufteilen der Lösung in Abschnitte, die mit Teilzielen abgeschlossen werden, können die Lernenden die der Lösung zugrunde liegende Zielstruktur erfassen, woraus auf Verallgemeinerungen geschlossen werden kann.

Damit der Einsatz vollständig ausgearbeiteter Lösungsbeispiele einen lernförderlichen Effekt erzielen und somit den Kompetenzerwerb unterstützen kann, muss durch die genannten Aspekte gewährleistet werden, dass die Schüler die Beispiele ausreichend studieren und analysieren (vgl. Renkl et al. 2005, S. 238). Dazu müssen konkrete Überlegungen zum Zusammenwirken mehrerer Beispiele im Verlauf von Lernmaterialien getrof-

fen werden. Die inter-example features befassen sich mit den Fragen, wie viele Lösungsbeispiele gezeigt werden sollen, ob und wie diese Beispiele variieren, in welche Kontexte sie eingebettet werden und wie das praktische Üben mit dem Lernen aus Lösungsbeispielen kombiniert werden kann. Zur Beantwortung dieser Fragen ist es zunächst von zentraler Bedeutung, dass das Arbeiten mit mindestens zwei Lösungsbeispielen dem Arbeiten mit nur einem Lösungsbeispiel überlegen ist, da die Lernenden die in den behandelten Beispielen zugrundeliegenden Prozeduren einfacher abrufen können. Eine Variation der innerhalb der Beispiele gelösten Probleme kann vorteilhaft sein, da die Lernenden die Lösungsprozedur in anderen Problemen wiederfinden und dadurch ein breiteres Schema konstruieren können. Dabei gilt es zu beachten, dass die Schüler dadurch nicht zusätzlich kognitiv belastet werden. Aus diesem Grund sollten die Probleme erst dann mehr variieren, wenn die Schüler bereits über ein fundamentales Lösungsschema verfügen. Außerdem beziehen sich die inter-example features auf die Oberflächenmerkmale von Lösungsbeispielen. Damit sind Kontexte gemeint, in die die Beispiele eingebettet sind, die aber für die eigentliche Lösung nebensächlich sind. Besonders Lernende, die noch kein Schema zur Lösungsprozedur ausgebildet haben und somit über wenig Vorwissen verfügen, konzentrieren sich vermehrt auf die Oberflächenmerkmale von Lösungsbeispielen und weniger auf den eigentlichen Lösungsweg. Dies wird besonders daran deutlich, dass Schüler mit wenig Vorwissen Lösungsbeispiele anhand der oberflächlichen Strukturen kategorisieren. Wünschenswert wäre eine Kategorisierung anhand der Problemstellung, weil dadurch auch die Lösungsstrategie berücksichtigt wird. Daher wird vorgeschlagen, die Struktur der Lösungsbeispiele verstärkt zu betonen, indem die Kontexte variieren, damit es nicht zu einer Kategorisierung der Beispiele anhand von Oberflächenmerkmalen kommt. (Vgl. Atkinson et al. 2000, S. 191ff.; Große 2005, S. 32f.) Die Effektivität vollständig ausgearbeiteter Lösungsbeispiele lässt sich durch die Fähigkeit der Lernenden feststellen, konventionelle Aufgaben mit gleichartigen Problemstellungen eigenständig zu lösen. Die Lernenden erhalten bei dem Versuch, derartige konventionelle Aufgaben lösen zu wollen, die direkte Rückmeldung, ob sie das Lösungsbeispiel verstanden haben. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber auch, dass die Kombination aus Lösungsbeispielen und Aufgaben zur Selbsterklärungsaktivität der Schüler beitragen kann. Dabei ist das Arbeiten mit Lösungsbeispiel-Aufgaben-Paaren, also dass auf jedes

Beispiel eine baugleiche konventionelle Aufgabe folgt, dem Arbeiten mit einem Set an Beispielen gefolgt von konventionellen Aufgaben überlegen. (Vgl. Renkl et al. 2005, S. 238f.; Atkinson et al. 2000, S. 194f.; Große 2005, S. 33) Der Übergang von dem Lernen aus Lösungsbeispielen zum eigenständigen Lösen konventioneller Aufgaben gestaltet sich für die Lernenden allerdings nicht immer einfach. Aus diesem Grund kann folgendes Vorgehen sinnvoll sein: Wenn Schüler zunächst an ein Thema herangeführt werden, bieten sich vollständig ausgearbeitete Lösungsbeispiele an. Nachfolgend könnten strukturgleiche, aber unvollständig ausgearbeitete Lösungsbeispiele genutzt werden, sodass die Schüler zum Vergleich und zur Analyse mit dem zuvor gegebenen vollständigen Beispiel angehalten werden. Durch diese *fading*-Prozedur, also das Weglassen einzelner Teilschritte, wird die Selbsterklärungsaktivität in Form von Antizipation des nächsten Lösungsschritts gefördert. Infolgedessen kann eine baugleiche konventionelle Aufgabe das eigenständige Lösen sichern. Die Vorgehensweise ist jedoch einerseits von der Expertise der Schüler abhängig und andererseits von der Komplexität des Lösungsbeispiels. Auf kurze und einfache Lösungsbeispiele kann auch direkt die strukturgleiche konventionelle Aufgabe folgen. (Vgl. Renkl et al. 2005, S. 238f.; Große 2005, S. 33f.)

3.3.3 Effekt der Problemvervollständigung

Mit der soeben beschriebenen *fading*-Prozedur wird der Effekt der Problemvervollständigung angesprochen. Dieser Effekt beschreibt eine weitere Gestaltungsmaßnahme zur Verringerung der kognitiven Belastung. Problemvervollständigungsaufgaben bestehen aus einem Problemzustand, einer lückenhaften Lösung und einem Zielzustand. Die Lernenden sollen die Lücken in dem Lösungsweg ausfüllen und so an eine eigenständige Lösung herangeführt werden. Damit schlagen Problemvervollständigungsaufgaben die Brücke zwischen vollständig ausgearbeiteten Lösungsbeispielen und konventionellen Problemlöseaufgaben. Der Einsatz von Lösungsbeispielen, auf die Vervollständigungsaufgaben folgen und darauf aufbauend konventionelle Aufgaben gelöst werden sollen, wurde bisher als *fading*-Prozedur bezeichnet und ist auch als *Vervollständigungsstrategie* bekannt. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 275ff.; Rey 2009, S. 111; Rey 2008, S. 23; Große 2005, S. 33f.; Wellenreuther 2010a, S. 97f.)

3.3.4 Effekt der abschwächenden Unterstützung

Die Vervollständigungsstrategie kann mit dem Effekt der abschwächenden Unterstützung gleichgesetzt werden. Während die Lernenden mit vollständig ausgearbeiteten Lösungsbeispielen die größtmögliche Unterstützung durch die beispielhaft dargelegte Lösungsstrategie bekommen, wird die Unterstützung weniger, je mehr Lücken in die Problemvervollständigungsarbeiten eingebaut werden. Schlussendlich sollen die Schüler selbstständig konventionelle Aufgaben lösen, bei denen sie keine unterstützenden Hilfestellungen zur Verfügung haben. Der Effekt der abschwächenden Unterstützung wird mit der steigenden Expertise der Schüler begründet. Während Lernende mit wenig Vorwissen möglichst viel Unterstützung benötigen, können Hilfestellungen mit zunehmender Expertise zurückgenommen werden.²⁹ (Vgl. Rey 2009, S. 111; Rey 2008, S. 30)

3.3.5 Variabilitätseffekt

Der Variabilitätseffekt besagt, dass Schüler bessere Transferleistungen erbringen, wenn sie mit variablen Aufgabenstellungen lernen (vgl. Sweller et al. 1998, S. 286). Hier lässt sich eine Parallele zu den intra-example-features finden, die beim Einsatz von vollständig ausgearbeiteten Lösungsbeispielen beachtet werden müssen. Besonders die Fokussierung auf strukturelle Merkmale steht hier im Vordergrund (siehe Seite 70). Sie besagt, dass die Schüler aus der Aufgabenstellung die strukturellen und für das Lösen des Problems relevanten Merkmale erkennen sollen. Das Variieren der Aufgabenstellungen kann einen Beitrag dazu leisten, dass die Schüler oberflächliche und für die Lösung unwichtige Merkmale herausfiltern. Um die richtige Lösungsstrategie anwenden zu können, ist es wichtig, dass die Probleme korrekt kategorisiert werden. Eine Kategorisierung sollte anhand der strukturellen Merkmale erfolgen, sodass ein paralleler Aufbau eines entsprechenden Schemas stattfinden kann. Wenn die Schüler vor ein Problem gestellt werden, dürfen sie sich nicht durch oberflächliche Merkmale ablenken lassen. Quilici & Mayer (1996) können nachweisen, dass eine hohe Variabilität in den Aufgabenstellungen zu einem besseren Lernerfolg führt. An zwei Testgruppen werden drei

²⁹ Die Berücksichtigung der Expertise wird durch den *Expertise-Umkehr-Effekt* expliziert, der ebenfalls im weiteren Verlauf des Kapitels thematisiert wird. Dieser Effekt besagt, dass sich die Wirkung von Gestaltungseffekten der Cognitive Load Theorie mit steigender Expertise umkehren kann. Dementsprechend sind vollständig ausgearbeitete Lösungsbeispiele besonders bei Novizen effektiv. (Vgl. Rey 2009, S. 115f.)

Aufgabenblätter ausgeteilt: Auf jedem Aufgabenblatt sind Aufgaben zur selben Struktur zu finden.³⁰ Die Aufgaben der Aufgabenblätter für die erste Testgruppe sind in drei unterschiedliche Kontexte eingebettet. Diese Kontexte variieren pro Aufgabenblatt und somit pro Themenbereich. Auf dem ersten Aufgabenblatt, das sich mit Aufgaben zur Anwendung des t-Tests befasst, sind drei unterschiedliche Kontexte zu finden. Diese Kontexte werden für das zweite (Chi-Quadrat-Test) und dritte Aufgabenblatt (Korrelationen) wiederholt. Die erste Testgruppe arbeitet daher mit einem Set an strukturbetonten Aufgaben, weil keine Verknüpfung zwischen den Aufgaben und den oberflächlichen Geschichten, in die sie eingebettet sind, stattfinden kann. Für die zweite Testgruppe sind die Aufgaben ebenfalls in unterschiedliche Kontexte eingebettet, jedoch variieren diese nicht in jedem Aufgabenblatt. Stattdessen wird jedes Aufgabenblatt mit einem festen Kontext verknüpft, der für jedes Aufgabenblatt variiert. Demnach hat das erste Aufgabenblatt zur Berechnung des t-Tests einen Kontext, der sich von dem Kontext des zweiten Aufgabenblattes zur Berechnung des Chi-Quadrat-Tests unterscheidet. Das dritte Aufgabenblatt zur Berechnung von Korrelationen ist wiederum in einen anderen Kontext eingebettet als die anderen beiden Aufgabenblätter. Diese Testgruppe arbeitet daher mit Aufgaben, die die oberflächlichen Merkmale hervorheben. Nachdem die Probanden mit den Aufgabenblättern gearbeitet haben, sollen sie verschiedene Problemstellungen kategorisieren (t-Test, Chi-Quadrat-Test, Korrelationen). Schlussendlich können die Probanden der ersten Testgruppe, die mit strukturbetonten Aufgaben und variierenden Kontexten arbeiten, die Probleme besser kategorisieren als die Probanden der zweiten Testgruppe. (Vgl. Quilici & Mayer 1996, S. 152f.; siehe auch Sweller et al. 1998, S. 287) Je höher also die Variabilität der Kontexte in den Aufgabenstellungen ist, desto weniger lassen sich die Lernenden von oberflächlichen Merkmalen ablenken.

Das Bearbeiten von Aufgaben mit hoher Variabilität scheint für die Schüler kognitiv belastend zu sein, weil sich die Lernenden mit jeder Aufgabe in einen neuen Kontext eindenken müssen. Allerdings wird damit auch die Anwendbarkeit eines vorhandenen Schemas erweitert, was zu einer besseren Transferleistung führt. Die Erhöhung der kognitiven

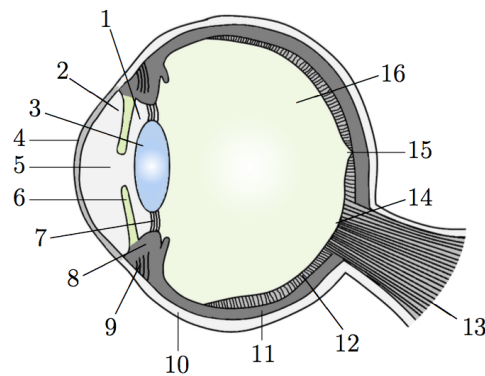
³⁰ Inhaltlich handelt es sich um den Themenbereich Statistik. Das erste Aufgabenblatt enthält Aufgaben, in denen der t-Test angewendet wird, das zweite Aufgabenblatt befasst sich mit Aufgaben zum Chi-Quadrat-Test und das dritte Aufgabenblatt beinhaltet Aufgaben zur Korrelation. (Vgl. Quilici & Mayer 1996, S. 152)

Belastung liegt hier in der benötigten hohen Aufmerksamkeit der Schüler begründet. Die hohe kognitiven Belastung und die damit verbundene Verbesserung der Transferleistung gleicht einem Paradoxon im Sinne der Cognitive Load Theorie. Dieses *Transfer-Paradoxon* bezieht sich auf jegliche Lernmaterialien, die zu einer Verbesserung der Transferleistung führen sollen, da sie gleichzeitig die negative Wirkung haben, die kognitive Belastung beim Lernenden zu erhöhen. Diese hohe kognitive Belastung der Lernenden lässt sich ebenfalls durch eine hohe lernrelevante kognitive Belastung erklären. Der Variabilitätseffekt ist demnach an die Anwendung der in diesem Kapitel vorgestellten Effekte gebunden, die besonders die extrinsische kognitive Belastung verringern, da der Variabilitätseffekt selbst nicht zu einer Reduzierung der extrinsischen Belastung, sondern zu einer Erhöhung der lernrelevanten kognitiven Belastung führt. Mit anderen Worten: Für eine Verbesserung der Transferleistung ist der Variabilitätseffekt von zentraler Bedeutung, welcher zur Erhöhung der lernrelevanten kognitiven Belastung führt. Damit genügend freie Kapazitäten vorhanden sind und der Variabilitätseffekt lernförderlich ist, müssen Gestaltungsmaßnahmen ergriffen werden, die zur Reduzierung der extrinsischen kognitiven Belastung führen. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 287ff.)

3.3.6 Effekt der geteilten Aufmerksamkeit

Der Effekt der geteilten Aufmerksamkeit wurde zunächst in Verbindung mit der Konzeption vollständig ausgearbeiteter Lösungsbeispiele postuliert (vgl. Chandler & Sweller 1992, S. 233ff.; Sweller et al. 1998, S. 277ff.; Atkinson et al. 2000, S. 186ff.). Werden in Lösungsbeispielen verschiedene Informationsquellen verwendet – hier sei kurz an das mathematische Lösungsbeispiel zur Winkelberechnung erinnert, das durch eine zugehörige Skizze unterstützt wird (siehe Seite 70) – sollten diese zusammengehörigen Informationen nicht getrennt voneinander dargestellt werden. Die Schüler müssten im Falle einer Trennung dieser Informationsquellen ihre Aufmerksamkeit einerseits auf den Rechenweg und andererseits auf die Zeichnung lenken, um das Lösungsbeispiel verstehen zu können. Diese geteilte Aufmerksamkeit führt zu einer Erhöhung der extrinsischen kognitiven Belastung, da die Lernenden die zusammengehörigen Informationen mental integrieren müssen. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 278ff.; Wellenreuther 2010a, S. 98f.)

Es gilt jedoch nicht nur innerhalb von Lösungsbeispielen den Aufmerksamkeitsteilungseffekt zu vermeiden, vielmehr lässt sich dies auch auf die generelle Gestaltung von Lernmaterialien übertragen. Wenn mehrere Informationsquellen zum Verständnis des Inhaltes benötigt werden, führt eine physikalische oder eine zeitliche Trennung dieser zu einer Erhöhung der extrinsischen kognitiven Belastung der Lernenden. Dieser Effekt bezieht sich auf alle Arten von Informationen. Es kann sich, neben einem Text- und einem Bildelement, auch um zwei Textelemente oder einen Text und eine zugehörige mathematische Gleichung handeln. Wichtig dabei ist, dass Informationen integriert dargestellt werden, wenn sie für sich allein stehend keinen Sinn ergeben. (Vgl. Ayres & Sweller 2005, S.135ff.) Zur Verdeutlichung der Vermeidung des Aufmerksamkeitsteilungseffekts soll die Abbildung 3.5 dienen, die sich in zwei Unterabbildungen gliedert:



1=Hintere Augenkammer, 2=Vordere Augenkammer, 3=Linse, 4=Hornhaut, 5=Pupille, 6=Iris, 7=Zonulafasern, 8=Ciliarkörper, 9=Ciliarmuskel, 10=Lederhaut 11=Aderhaut, 12=Netzhaut, 13=Sehnerv, 14=Blinder Fleck, 15=Gelber Fleck, 16=Glaskörper

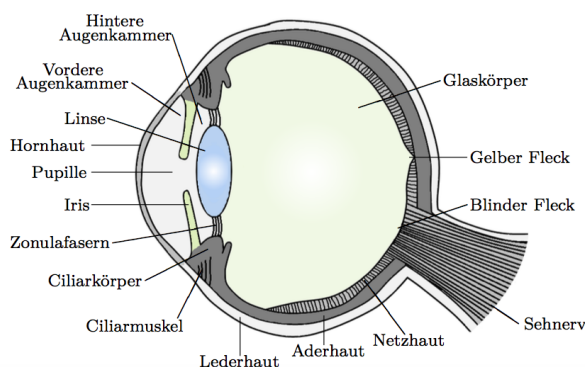


Abbildung 3.5: Vermeidung des Aufmerksamkeitsteilungseffekts.³¹

Diese Abbildung zeigt zwei Möglichkeiten, eine Zeichnung zu beschriften, wobei es sich hier um eine schematische Zeichnung zum Aufbau des

³¹ Eigene Zeichnung zum Aufbau des Auges, vgl. z. B. Purves, Sadava, Orians & Heller 2006, S.1090.

menschlichen Auges im Querschnitt handelt. In der oberen Abbildung sind die zusammengehörigen Informationen getrennt voneinander dargestellt, indem die Bestandteile des menschlichen Auges sowie die direkt darunter stehenden Begriffe mit Ziffern versehen sind. Eine Teilung der Aufmerksamkeit auf die Zeichnung und die zugehörigen Begriffe ist die Folge. Jedoch führt nicht nur die Aufmerksamkeitsteilung zu einer Erhöhung der extrinsischen kognitiven Belastung, vielmehr ist dabei die visuelle Suche nach den zusammengehörigen Informationen und deren mentale Integration extrinsisch kognitiv belastend (vgl. Ayres & Sweller 2005, S. 143). Dieser negative Effekt kann verhindert werden, indem – wie in der unteren Zeichnung dargestellt – die Begriffe direkt in die Zeichnung integriert werden. Durch diese Umstrukturierung ändern sich weder die einzelnen Informationen noch der fachliche Inhalt, jedoch kann das Arbeitsgedächtnis extrinsisch entlastet werden, um so für genügend freie lernrelevante Kapazitäten zu sorgen.

Der Aufmerksamkeitsteilungseffekt sollte allerdings nur dann vermieden werden, wenn die einzelnen Informationen alleinstehend keinen Sinn ergeben. Können beispielsweise aus einem Diagramm alle nötigen Informationen entnommen werden, um den Inhalt zu verstehen, können zusätzliche textliche Informationen, welche die Inhalte nur wiederholen, zu lernhinderlichen Redundanzen führen.³² (Vgl. Ayres & Sweller 2005, S. 145)

Die lernförderliche Wirkung durch die Vermeidung des Aufmerksamkeitsteilungseffekts kann durch das *räumliche* und *zeitliche Kontiguitätsprinzip* nach Mayer (2001) unterstützt und erweitert werden.³³ Das räumliche Kontiguitätsprinzip meint, dass die zusammengehörigen Informationen möglichst nah beieinander präsentiert werden sollten. Handelt es sich beispielsweise um die Beschreibung eines Vorgangs, kann eine Integration von langen, ausführlichen Textpassagen in Bildelemente zu einer Über-

³² Die Vermeidung des Redundanzeffekts stellt eine weitere Gestaltungsmaßnahme zur Reduzierung der kognitiven Belastung dar und wird im weiteren Verlauf des Kapitels ausführlich dargestellt.

³³ Die im Original als *Spatial Contiguity Principle* und *Temporal Contiguity Principle* bezeichneten Gestaltungsmerkmale basieren nicht auf der Cognitive Load Theorie (CLT). Die grundlegende Theorie, zu der sich diese Prinzipien zuordnen lassen, ist die *Cognitive Theory of Multimedia Learning (CTML)* von Richard E. Mayer. Die CTML basiert auf vergleichbaren Konzepten zur Architektur des menschlichen Gedächtnisses wie die CLT und liefert ebenfalls Gestaltungsempfehlungen zur Reduzierung extrinsischer kognitiver Prozesse. (Vgl. Mayer 2005, S. 183ff.; Mayer 2001, S. 81ff., S. 96ff.) Aufgrund der zahlreichen Anknüpfungspunkte zum Effekt der geteilten Aufmerksamkeit werden das räumliche sowie das zeitliche Kontiguitätsprinzip hier ausführlich dargestellt.

ladung führen und sich dadurch negativ auf die extrinsische kognitive Belastung auswirken. Stattdessen sollten die Bild- und Textelemente in unmittelbarer Nähe zueinander positioniert werden. (Vgl. Mayer 2005, S. 189; 2001, S. 87f.; Mayer & Moreno 1998, S. 312ff.)

Würde beispielsweise in die Abbildung 3.5, die den Aufbau des menschlichen Auges zeigt, zusätzlich die Funktion eines jeden Bestandteils integriert werden, wäre die Abbildung zu unübersichtlich und zu komplex. In diesem Fall würde es sich anbieten, die Abbildung zu splitten und mit jedem Bild die zentralen Bestandteile in den Vordergrund zu rücken. Neben jedem Teilbild könnte die textliche Beschreibung zur Funktion der Bestandteile positioniert werden. Die folgende Abbildung 3.6 steht exemplarisch für die Anwendung des räumlichen Kontiguitätsprinzips.

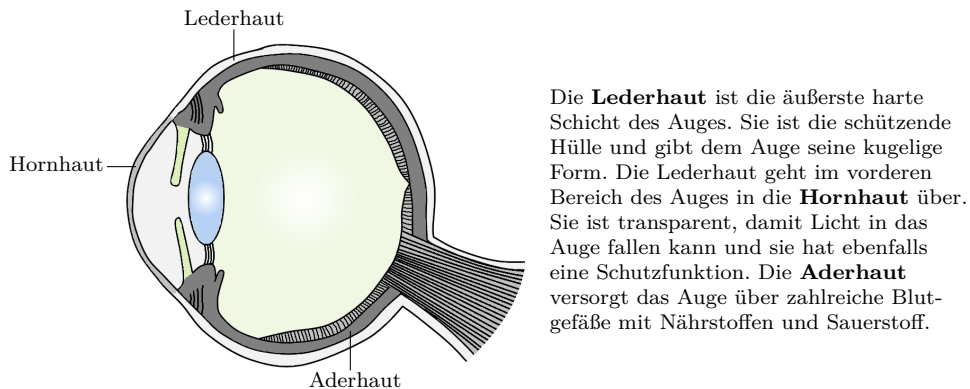


Abbildung 3.6: Anwenden des räumlichen Kontiguitätsprinzips.³⁴

Diese Abbildung zeigt eine Möglichkeit, textliche und bildliche Informationen – dem räumlichen Kontiguitätsprinzip entsprechend – möglichst nah beieinander zu präsentieren. Hier handelt es sich um die Beschreibung der drei Elemente Lederhaut, Hornhaut und Aderhaut, unterstützt durch die Zeichnung, in der deren Position verdeutlicht ist. Zusätzlich wird in dieser Abbildung die visuelle Suche erleichtert, da die Beschriftung der Zeichnung von oben nach unten der Reihenfolge der textlichen Beschreibung entspricht.

Dasselbe Prinzip zur räumlichen Kontiguität lässt sich auf die zeitliche Trennung aufeinander bezogener Informationen anwenden. Als Beispiel für das zeitliche Kontiguitätsprinzip kann ein Kinofilm genannt werden.

³⁴ Beschreibung der Lederhaut, Hornhaut und Aderhaut vgl. Purves et al. 2006, S. 1089.

Die Tonspur und die Bildfolge sind zeitlich aufeinander abgestimmt. Wird die Bildfolge knapp vor der Tonspur präsentiert, muss der Zuschauer den Ton und die Bilder mental integrieren, was zu einer Erhöhung der extrinsischen kognitiven Belastung führt. Die einzelnen Informationselemente sind dadurch zwar nicht verändert worden, sondern lediglich deren zeitliche Präsentation, jedoch ist die mentale Integration für den Zuschauer sehr anstrengend. (Vgl. Ayres & Sweller 2005, S. 143f.) Gleiches lässt sich auf die Kopplung von Unterrichtsinhalten übertragen. Werden eine Grafik und ein gesprochener Text zum Verständnis der Inhalte benötigt, sollten diese zeitgleich präsentiert werden. Ansonsten muss der Lernende die Informationen aus der Grafik zwischenspeichern und später mit den gesprochenen Informationen in Zusammenhang bringen. Dies führt zu einem Anstieg der extrinsischen kognitiven Belastung. (Vgl. Mayer 2001, S. 100ff.) Das räumliche und das zeitliche Kontiguitätsprinzip unterscheiden sich hinsichtlich der Modalität, also der „Sinnesrezeption“ (Hasselhorn & Gold 2008, S. 365). Das räumliche Kontiguitätsprinzip kann als „monomodal“ (ebd.) angesehen werden, weil die Informationen nur visuell mit den Augen erfasst werden. Das zeitliche Kontiguitätsprinzip bezieht sich auf das Erfassen von Informationen durch mehrere Sinne und kann als „multimodal“ (ebd.) bezeichnet werden. Für den konkreten Fall, dass die Informationen durch genau zwei Sinne gleichzeitig aufgenommen werden, beispielsweise audiovisuell durch die Augen und Ohren, kann von einer „bimodalen“ (ebd.) Präsentation gesprochen werden. (Vgl. Mayer 2001, S. 102)

Das zeitliche Kontiguitätsprinzip und das damit verbundenen Ansprechen mehrerer Sinneskanäle steht in Zusammenhang mit einem weiteren Effekt der Cognitive Load Theorie zur Reduzierung der extrinsischen kognitiven Belastung: dem Modalitätseffekt.

3.3.7 Modalitätseffekt

Der Modalitätseffekt bezieht sich auf die Informationsaufnahme über mehrere Sinne und lässt sich aus dem Effekt der geteilten Aufmerksamkeit ableiten, da es sich um die Kombination einzelner Informationselemente handelt, die für sich genommen keinen Sinn ergeben. Die multimodale Präsentation von Inhalten ist bei gleichzeitiger Präsentation hinsichtlich der Effektivität der monomodalen Präsentation überlegen. Dementsprechend ist es für das Arbeitsgedächtnis entlastender, wenn ein schriftliches

Lösungsbeispiel, das visuell aufgenommen wird, nicht durch eine schriftliche, sondern durch eine auditive Erklärung unterstützt wird. Begründet wird die höhere Lernwirksamkeit durch den gleichzeitigen Gebrauch des visuell-räumlichen sketchpads und der phonologischen Schleife im Arbeitsgedächtnis (siehe das Arbeitsgedächtnismodell auf Seite 37). (Vgl. Low & Sweller 2005, S. 147ff.; Sweller et al. 1998, S. 281ff.) Das visuell-räumliche sketchpad verarbeitet im Fall dieser bimodalen Präsentation die Informationen aus dem schriftlichen Lösungsbeispiel, während die phonologische Schleife die auditiv-verbale Informationen aufnimmt. Die kognitive Belastung verteilt sich dadurch auf die beiden Arbeitsgedächtnismodellkomponenten, sodass keine der beiden Sinneskanäle überlastet wird. Bei monomodaler Präsentation wird nur ein Sinneskanal genutzt und es kann bei einer Fülle an Informationen, die simultan im Arbeitsgedächtnis verarbeitet und mit vorhandenen Wissensstrukturen verknüpft werden, zu einer Überlastung des genutzten Kanals kommen. Zudem kann die kognitive Belastung bei bimodaler Präsentation verringert werden, da ein auditiv-verbaler Text im Arbeitsgedächtnis genauer behalten werden kann als eine Grafik. (Vgl. Niegemann et al. 2008, S. 47f.; S. 200f.) Besonders wirksam ist der Modalitätseffekt, wenn es sich um Materialien handelt, die eine hohe Elementinteraktivität aufweisen. Demnach können bei einer hohen intrinsischen Belastung bessere Lernergebnisse erzielt werden, wenn die extrinsische Belastung durch den Modalitätseffekt verringert wird, indem sich ergänzende Informationen bi- bzw. multimodal präsentiert werden. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 282f.) Auch beim Modalitätseffekt muss darauf geachtet werden, dass die Lernenden während der bimodalen Präsentation von Informationen nicht durch das visuelle Suchen unnötig kognitiv belastet werden. Wird beispielsweise über ein Diagramm gesprochen, sollten diejenigen Teile, über die in dem Moment gesprochen wird, hervorgehoben werden. Auch das Zeigen mit einem Laserpointer kann ausreichend sein. (Vgl. Kalyuga, Ayres, Chandler & Sweller 2003, S. 26)

Der Modalitätseffekt ist jedoch nur unter denselben Bedingungen lernförderlich, die auch bei der Vermeidung des Aufmerksamkeitsteilungseffekts gelten. Bei den einzelnen Informationen muss es sich um Inhalte handeln, die einander ergänzen und für sich allein stehend keinen Sinn ergeben. Sie dürfen also nicht redundant sein. Wenn dieselben Informationen schriftlich als auch verbal präsentiert werden, können Redundanzen

zu Lernhindernissen im Arbeitsgedächtnis führen. (Vgl. Low & Sweller 2005, S. 148; Niegemann et al. 2008, S. 48) Außerdem sollten gesprochene Texte kurz gehalten werden, weil die Aufmerksamkeit der Schüler bei längeren Texten rapide abnehmen kann (vgl. Niegemann et al. 2008, S. 201).

3.3.8 Redundanzeffekt

Der Redundanzeffekt wurde zunächst in Verbindung mit der negativen Wirkung des Modalitätseffekts bei der multimodalen Präsentation derselben Informationen postuliert. Der Redundanzeffekt tritt ein, wenn Informationen unterschiedlicher Art miteinander kombiniert werden, die sich mit demselben Inhalt befassen und für sich genommen verständlich sind. (Vgl. Sweller et al. 1998, S. 283) Untersucht wurde die lernhinderliche Wirkung von Redundanzen von Chandler und Sweller (1991), indem sie eine Zeichnung des Herz-Kreislaufsystems mit Informationen zur Blutzirkulation verknüpft haben. Innerhalb der Abbildung sind die Bestandteile des Herzens und der Lunge beschriftet und die Richtung des Blutflusses ist durch Pfeile kenntlich gemacht. Die Abbildung ist durch zusätzliche Informationen erweitert, die den Blutfluss konkret beschreiben. Diese Informationen befinden sich für die erste Testgruppe unterhalb der Abbildung und für die zweite Testgruppe sind die textlichen Informationen in integrierter Form an jedem Pfeil zu finden. Diese ausformulierten Informationen können als redundant angesehen werden, da bereits alle Informationen aus der Abbildung zu entnehmen sind. Die dritte Testgruppe beschäftigt sich mit der Abbildung ohne textliche Zusatzinformationen. Probanden der dritten Testgruppe, die mit der Abbildung ohne die ausformulierten Informationen gearbeitet haben, können die Inhalte besser wiedergeben, als Probanden, die die Abbildung mit den redundanten Informationen bearbeitet haben. Jedoch kann auch hier ein kleiner Unterschied gemacht werden: Die erste Testgruppe, für die sich die zusätzlichen Informationen unterhalb der Abbildung befinden, schneiden im Behalten und Verstehen der Inhalte schlechter ab als die zweite Testgruppe, bei der die Informationen in die Abbildung integriert sind. Demnach wurde zwar der Aufmerksamkeitsteilungseffekt vermieden, jedoch ist dieser aufgrund des lernhinderlichen Redundanzeffekts weniger effektiv, als wenn die Redundanzen komplett vermieden werden. (Vgl. Chandler & Sweller 1991, S. 317ff.; siehe auch Sweller et al. 1998, S. 238f.)

3.3.9 Elementinteraktivitätseffekt

Der Elementinteraktivitätseffekt bezieht sich auf die Bedingungen, unter denen der Aufmerksamkeitsteilungs-, der Modalitäts- und der Redundanzeffekt eine lernförderliche Wirkung erzielen (vgl. Rey 2009, S. 97f.). Diese Bedingungen wurden bereits in den einzelnen Abschnitten zu den genannten Effekten beschrieben, jedoch fasst der Elementinteraktivitätseffekt als eigens formulierte Gestaltungsmaßnahme diese Zusammenhänge nochmals zusammen. Mithilfe der Elementinteraktivität kann festgestellt werden, wie hoch die durch das Lernmaterial verursachte intrinsische kognitive Belastung für die Lernenden ist. Wenn die einzelnen dargestellten Elemente stark miteinander interagieren, gilt es als umso wichtiger, die Gestaltungsmaßnahmen der Cognitive Load Theorie anzuwenden (siehe Abbildung 3.4 auf Seite 60). Der Effekt der geteilten Aufmerksamkeit und der Modalitätseffekt können nur dann eine lernförderliche Wirkung erzielen, wenn Informationen integriert werden, die für sich genommen keinen Sinn ergeben beziehungsweise unverständlich sind. Diese Informationen weisen dann eine hohe Elementinteraktivität auf. Aus diesem Grund kann gefolgert werden, dass die Vermeidung der Aufmerksamkeitsteilung und die multimodale Präsentation dann besonders effektiv sind, wenn die einzelnen Elemente stark miteinander interagieren und eine hohe intrinsische kognitive Belastung beim Lernenden erzeugen. (Vgl. Sweller & Chandler 1994, S. 192f.)

Die negative Wirkung bei der Integration redundanter Informationen, die für sich allein stehend verständlich sind, kann ebenfalls mit dem Elementinteraktivitätseffekt begründet werden: Redundante Informationen – ob integriert oder für sich allein stehend – erhöhen immer die Elementinteraktivität, da sie sich mit derselben Thematik befassen. Verbunden mit der Elementinteraktivität erhöht sich auch die intrinsische kognitive Belastung für die Lernenden, wodurch weniger freie Kapazitäten im Arbeitsgedächtnis vorhanden sind. Aus diesem Grund sollte im Lernmaterial komplett auf redundante Informationen verzichtet werden. (Vgl. Sweller & Chandler 1994, S. 193f.; Chandler & Sweller 1991, S. 328ff.)

3.3.10 Effekt der Isolation interagierender Elemente

Der Effekt der Isolation interagierender Elemente greift die Elementinteraktivität auf und befasst sich mit der intrinsischen kognitiven Belastung.

Die bisher vorgestellten Effekte dienen zur Verringerung der extrinsischen kognitiven Belastung (ausgenommen der Variabilitätseffekt, der zur Erhöhung der lernförderlichen kognitiven Belastung dient), um so mehr freie Kapazitäten im Arbeitsgedächtnis zu schaffen, damit die Inhalte verstanden werden können. Jedoch gibt es Lernmaterialien, die aus Inhalten mit einer sehr hohen Elementinteraktivität bestehen. Diese hohe Interaktivität der einzelnen Elemente führt dazu, dass zu viele Elemente simultan im Arbeitsgedächtnis verarbeitet werden müssten, um die Inhalte zu verstehen. Die intrinsische kognitive Belastung ist in diesem Fall so hoch, dass selbst eine Reduktion der extrinsischen kognitiven Belastung nicht genügend freie Kapazitäten zur Verarbeitung der Elemente schafft. Besonders betroffen sind Lernende, die kein Vorwissen zur behandelten Thematik besitzen und somit noch keine entsprechenden Schemata ausgebildet haben. Eine Reduzierung der dargestellten Elemente würde jedoch zur Folge haben, dass die Inhalte nicht verstanden werden, weil die Elemente durch deren hohe Interaktivität in Isolation keinen Sinn ergeben. Lernende mit adäquatem Vorwissen und bereits ausgebildeten Schemata hingegen können alle Elemente simultan im Arbeitsgedächtnis behalten und mit den vorhandenen Schemata verknüpfen, wodurch sich die Zahl der zu verarbeitenden Elemente verringert. An dieser Stelle kann von einem *Paradoxon* der Cognitive Load Theorie gesprochen werden: Lernmaterialien, die eine hohe Elementinteraktivität aufweisen, können dann verstanden werden, wenn der Lernende über ein vorhandenes Schema verfügt und er dadurch imstande ist, alle zum Verständnis erforderlichen Elemente simultan im Arbeitsgedächtnis zu verarbeiten. Bis jedoch das erforderliche Schema konstruiert worden ist, können nicht alle Elemente simultan im Arbeitsgedächtnis verarbeitet werden, wodurch ein Verstehen der Inhalte ausbleibt. Für Novizen muss bei komplexen Lernmaterialien der Kompromiss eingegangen werden, dass der anfängliche Aufbau eines Schemas nicht durch ein Verstehen der Inhalte geschehen kann. Dieser Kompromiss widerspricht dem Ziel, die Konstruktion von Schemata durch ein Verstehen zu fördern. (Vgl. Pollock, Chandler & Sweller 2002, S. 63f.)

Werden die interagierenden Elemente getrennt voneinander dargestellt, kann zwar kein Verständnis erzielt werden, jedoch kann dadurch ein erstes mentales Gerüst für die Thematik gebildet werden. Eine anschließende Zusammenführung der interagierenden Elemente führt zu einer Verknüpfung der zuvor aufgenommenen Inhalte und kann in diesem

zweiten Schritt zu einem Verständnis führen. Der Effekt der Isolation interagierender Elemente präferiert daher bei Materialien mit hoher Elementinteraktivität eine serielle anstelle einer simultanen Verarbeitung. (Vgl. Pollock et al. 2002, S. 65f.)

Mayer und Chandler (2001) überprüfen die These der seriellen Verarbeitung mithilfe einer 16-gliedrigen Bilderreihe inklusive textlicher Informationen, die den Vorgang der Gewitterentstehung beschreiben. Sie untersuchen dabei die Art und Weise, in der die serielle Verarbeitung vonstatten gehen soll. Einerseits stellen sie dabei heraus, dass Probanden, die zunächst mit den einzelnen Bildern arbeiten und in einem zweiten Schritt die gesamte Bilderreihe präsentiert bekommen, eine bessere Verstehensleistung – gemessen an der Transferleistung – erzielen als Probanden, die erst mit der gesamten Bilderreihe konfrontiert werden und danach die einzelnen Bilder verinnerlichen. Andererseits können sie festhalten, dass ein Verstehen besser gefördert werden kann, wenn die Bilder zunächst einzeln und anschließend in derselben Weise noch einmal präsentiert werden, als bei zweifacher Präsentation der gesamten Bilderreihe. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass nicht allein die serielle Verarbeitung der Inhalte eine lernförderliche Wirkung erzielt, sondern dass entweder nur die einzelnen Elemente wiederholt oder zunächst die einzelnen Elemente und danach die Elemente in ihrer Gesamtheit zu einem Verstehen der Inhalte führen. (Vgl. Mayer & Chandler 2001, S. 391ff.)

Der Effekt der Isolation interagierender Elemente ist von besonderer Bedeutung bei Lernmaterialien, die eine hohe Elementinteraktivität aufweisen. Dies ist hauptsächlich der Fall, wenn es sich um Kausalketten handelt. Demnach sind Vorgangsbeschreibungen wie die zur soeben genannten Gewitterentstehung oftmals mit einer hohen Elementinteraktivität verbunden. Die Lernenden können durch die Betrachtung der einzelnen Elemente in einem ersten Schritt ein basales Schema bilden, das bei der gesamten Vorgangsbetrachtung im zweiten Schritt zu einem Kausalschema erweitert wird. (Vgl. Mayer & Chandler 2001, S. 393) Dieses Vorgehen kann auch in mehreren Schritten erfolgen, sodass vor der gesamten Vorgangsbeschreibung die einzelnen Elementen zu kleinen Einheiten zusammengefasst werden. Dadurch kann schrittweise ein Schema konstruiert werden, das letztendlich zu einem Verstehen der Inhalte führt. (Vgl. Sweller 2004, S. 24)

3.3.11 Imaginationseffekt

Der Imaginationseffekt ist, wie der Effekt der Isolation interagierender Elemente, von dem Vorwissen der Lernenden abhängig. Während sich der zweitgenannte Effekt besonders auf Schüler auswirkt, die über kein Vorwissen zur behandelten Thematik verfügen, richtet sich der Imaginationseffekt an Lernende mit vorhandenen Schemata. Sobald Schüler ein grundlegendes Schema zu einem Prozess ausgebildet haben, ist es wirksamer, wenn diese Schüler mit Aufgaben konfrontiert werden, in denen die gelernten Schritte mental zu wiederholen sind, als den Prozess noch einmal zu studieren. Die Imagination bereits gelernter Prozeduren hat auf Schüler mit vorhandenem Vorwissen eine lernförderliche Wirkung, weil das Wiederholen der Arbeitsschritte im Arbeitsgedächtnis zu einer Automatisierung des Schemas führt. (Vgl. Sweller 2004, S. 23f.)

Im Sportbereich gibt es häufig die Imaginationsstrategie, durch die ein Sportler sein Vorgehen immer wieder mental durchspielt und dadurch fortwährend automatisiert. Wenn ein Schüler beispielsweise lernen soll, wie ein Busfahrplan gelesen wird, kann er in einem ersten Schritt mit einer Beschreibung zum Lesen eines Fahrplans konfrontiert werden. Danach sollte er seinen Blick von der Beschreibung abwenden und die einzelnen Schritte mental visualisieren oder auch verbalisieren. Leahy & Sweller (2005) konnten belegen, dass diese Strategie effektiver ist als ein erneutes Betrachten der Beschreibung. Zudem konnten sie festhalten, dass diese Strategie auf Novizen keine lernförderliche Wirkung hat. (Vgl. Leahy & Sweller 2005, S. 267ff.)

Der Imaginationseffekt hat insofern bei Novizen eher eine kontraproduktive Wirkung, weil sich ein Lernender erst dann an eine Prozedur erinnern kann, wenn er bereits ein Schema dazu ausgebildet hat. Ein Schüler, der noch kein Vorwissen ausgebildet hat, kann durch Aufgaben, die sich den Imaginationseffekt zunutze machen, kognitiv überlastet werden. Ginns, Chandler & Sweller (2003) konnten nachweisen, dass kognitive Schemata zur behandelten Thematik vorhanden sein müssen, damit der Imaginationseffekt eine lernförderliche Wirkung erzielt, indem sie Novizen mit Aufgaben zum Imaginationseffekt konfrontiert haben (vgl. S. 236f.). Setzen sich hingegen Lernende mit einem adäquaten Vorwissen mit Aufgaben auseinander, in denen der Imaginationseffekt zur Anwendung kommt, sind diese deutlich besser in der Lage, die Inhalte zu transferieren. Der Vergleich wird hier zu Lernenden mit demselben Vorwissen gezogen, die

sich jedoch mit Aufgaben auseinandersetzen, in denen sie die Lösungsprozedur nur wiederholen. Begründet werden kann die bessere Transferleistung mit einer schnelleren Automatisierung des Schemas durch den Imaginationseffekt. Ein automatisiertes Schema wird im Arbeitsgedächtnis als nur eine Einheit gezählt, wodurch für Lernende mit einem solchen Schema die Gefahr reduziert wird, durch neue Inhalte kognitiv überlastet zu sein. (Vgl. Ginns et al. 2003, S. 240ff.) Wenn die beiden Phasen des Lernens rekapituliert werden, die aus der Aufnahme der Informationen in Verbindung mit einer ersten Konstruktion eines Schemas und der Automatisierung dieses Schemas bestehen, setzt der Imaginationseffekt in der zweiten Phase des Lernens an. Der Imaginationseffekt dient also zur Automatisierung eines vorhandenen Schemas und kann dadurch die extrinsische kognitive Belastung verringern. (Vgl. Cooper, Tindall-Ford, Chandler & Sweller 2001, S. 80f.)

3.3.12 Expertise-Umkehr-Effekt

Der Expertise-Umkehr-Effekt bezieht sich auf die Effektivität der einzelnen hier vorgestellten Gestaltungsmaßnahmen in Abhängigkeit von der Expertise der Lernenden. Dieser besagt, dass die Wirkung einzelner Effekte abgeschwächt wird oder sich gar umkehrt, wenn die Lernenden nicht über das entsprechende Vorwissen verfügen. Wie bereits an der einen oder anderen Stelle deutlich gemacht wurde, kann die Berücksichtigung eines Effekts nur dann eine lernförderliche Wirkung erzielen, wenn gleichzeitig auch das Vorwissen der Lernenden in den Blick genommen wird. An dieser Stelle wird der moderierende Einfluss der Expertise auf die einzelnen Effekte betrachtet.

Der *Effekt vollständig ausgearbeiteter Lösungsbeispiele* hat besonders auf Novizen eine lernförderliche Wirkung. Vollständig ausgearbeitete Lösungsbeispiele sind besonders effektiv, um ein basales Schema zum Lösen von Aufgaben zu konstruieren. Lernende werden dadurch an das Lösen der Problemzustände herangeführt und können durch die Analyse eines vollständig ausgearbeiteten Lösungsbeispiels ein erstes Gerüst für ein Schema konstruieren. Für Lernende, die bereits ein entsprechendes Schema ausgebildet haben, können vollständig ausgearbeitete Lösungsbeispiele lernhinderliche Redundanzen enthalten. Daher wäre ein Arbeiten mit konventionellen Aufgaben für Schüler mit einem entsprechenden Vorwissen ratsam, um das Schema zu automatisieren. (Vgl. Kalyuga et al. 2003, S. 26f.) Ka-

lyuga, Chandler & Sweller (2001) stellen zudem heraus, dass vollständig ausgearbeitete Lösungsbeispiele nur dann für Novizen signifikant effektiver sind als konventionelle Problemlöseaufgaben, wenn es sich um Inhalte mit einer hohen Elementinteraktivität handelt. Bei Aufgaben mit geringer Elementinteraktivität macht es keinen Unterschied, ob die Schüler mit vollständig ausgearbeiteten Lösungsbeispielen oder konventionellen Aufgaben an das Lösen dieser herangeführt werden. (Vgl. Kalyuga et al. 2001, S. 21f.)

Der *Effekt der Problemvervollständigung* ist besonders effektiv, wenn es sich um Materialien mit einer hohen Elementinteraktivität handelt und die Lernenden bereits ein erstes Schema ausgebildet haben und somit über ein geringes Vorwissen verfügen. Daher richtet sich dieser Effekt weder an Novizen noch an Experten. Aufgaben, die dem Effekt der Problemvervollständigung entsprechen, schlagen eine Brücke zwischen vollständig ausgearbeiteten Lösungsbeispielen und konventionellen Problemlöseaufgaben (siehe S. 73). Dies entspricht dem *Effekt der abschwächenden Unterstützung*, der sich auf das Zusammenwirken von Lösungsbeispielen, Problemvervollständigungsaufgaben und konventionellen Aufgaben in Abhängigkeit von der Expertise der Lernenden bezieht.

Der *Variabilitätseffekt* wirkt sich hingegen auf Lernende mit vorhandenem Vorwissen lernförderlich aus. Das Bearbeiten von Aufgaben, die in der Aufgabenstellung und den Kontexten variieren, erfordert eine hohe Konzentration und benötigt freie Kapazitäten im Arbeitsgedächtnis. Erst wenn ein Schüler bereits ein Schema zum Lösen derartiger Aufgaben ausgebildet hat, sind freie kognitive Kapazitäten vorhanden, weil das Schema als eine Einheit gezählt werden kann. Der Variabilitätseffekt hat zum Ziel, das vorhandene Schema zu automatisieren und zu einer höheren Transferleistung beizutragen. (Siehe S. 74)

Auch der *Imaginationseffekt* hat nur auf Lernende mit vorhandenem Vorwissen eine lernförderliche Wirkung. Cooper et al. (2001) vergleichen die Wirkung von vollständig ausgearbeiteten Lösungsbeispielen mit der Effektivität von Aufgaben zum Imaginationseffekt. Dabei stellen sie heraus, dass Lernende mit vorhandenem Vorwissen durch Aufgaben, in denen der Imaginationseffekt angewendet wird, bessere Lernergebnisse erzielen, als wenn sie mit Lösungsbeispielen arbeiten. Das gegenteilige Bild zeichnet sich für Lernende ab, die kein Vorwissen zur behandelten Thematik besitzen (vgl. S. 73ff.). Das Vorhandensein eines adäquaten Schemas ist

also die Voraussetzung für das Gelingen des Imaginationseffektes (vgl. Kalyuga et al. 2003, S. 28f.).

Für den Einfluss der Expertise auf den *Effekt der geteilten Aufmerksamkeit* muss dieser in Zusammenhang mit dem *Redundanzeffekt* betrachtet werden. Der Aufmerksamkeitsteilungseffekt erzielt nur dann eine lernförderliche Wirkung, wenn es sich um die Integration von Informationen handelt, die für sich genommen keinen Sinn ergeben und in Isolation nicht verstanden werden können. Handelt es sich hingegen um Elemente, die allein stehend verständlich sind, führt eine Integration dieser zu lernhinderlichen Redundanzen. Gleiches gilt für das Zusammenführen von Informationen, wenn die Lernenden bereits über ein entsprechendes Vorwissen verfügen. Selbst wenn die Informationen allein stehend für Novizen unverständlich sind, kann eine Integration dieser für Schüler mit vorhandener Expertise redundant sein. Aus diesem Grund wirkt sich der Effekt der geteilten Aufmerksamkeit besonders für Schüler ohne oder mit nur wenig Vorwissen lernförderlich aus. (Vgl. Kalyuga et al. 2003, S. 24f.) Dieselben Überlegungen können für die Expertiseabhängigkeit des *Modalitätseffekts* getroffen werden. Der Aufmerksamkeitsteilungseffekt und der Modalitätseffekt beziehen sich jeweils auf die Integration verschiedener Informationen, wobei der Modalitätseffekt für Informationen gilt, die sich in ihrer Modalität unterscheiden. Bei bimodaler Präsentation eines Diagramms mit gesprochenem Text können die gesprochenen Informationen für Lernende mit vorhandener Expertise redundant sein. In diesem Fall wäre die einfache Präsentation des Diagramms vorteilhaft. Aus diesem Grund kann der Modalitätseffekt besonders für Novizen lernförderlich sein (Vgl. Kalyuga et al. 2003, S. 26)

Der *Effekt der Isolation interagierender Elemente* ist für Lernmaterialien gedacht, die eine hohe Elementinteraktivität aufweisen und damit eine hohe intrinsische kognitive Belastung erzeugen. Dabei handelt es sich um eine Vielzahl von einzelnen Elementen, die allein stehend nicht verstanden werden können, sondern nur im Zusammenhang einen Sinn ergeben. Jedoch ist dies abhängig von der Expertise der Lernenden. Schüler mit viel Vorwissen haben die einzelnen interagierenden Elemente bereits in Form eines einzelnen Schemas abgespeichert, wodurch sie intrinsisch nicht überlastet werden. Für Novizen sollten diese Elemente aber zunächst isoliert voneinander gelernt werden, um ein basales Schema zu konstruieren, was durch eine Zusammenführung der einzelnen Elemente erweitert

und verstanden werden kann. Aus diesem Grund richtet sich der Effekt der Isolation interagierender Elemente besonders an Novizen. Lernende mit Expertise ziehen nachweislich keine Vorteile aus diesem Effekt. (Vgl. Kalyuga et al. 2003, S. 27f.; siehe auch S. 83)

3.3.13 Fazit, Kritik und Würdigung der Effekte der Cognitive Load Theorie

Durch die Gestaltungsempfehlungen, die zur Steuerung der kognitiven Belastung dienen, wird der *Weniger ist mehr*-Ansatz der Cognitive Load Theorie deutlich. Die extrinsische kognitive Belastung sollte demnach so gering wie möglich gehalten werden. Die Lernenden sollen nicht durch unnötige Erschwernisse oder Zusätze innerhalb der Lernmaterialien extrinsisch kognitiv belastet werden. Dadurch soll die lernrelevante kognitive Belastung erhöht werden und die Festigung und Automatisierung von Schemata gelingen, um somit ein Lernen zu ermöglichen. (Vgl. Rey 2009, S. 48) Unnötige Zusätze sind in Lernmaterialien häufig durch dekorative Bilder zu finden. Damit sind Abbildungen gemeint, die zwar eine ansprechende Wirkung auf die Lernenden haben, aber deren Informationsgehalt als gering einzustufen ist. Dekorative Bilder könnten das Arbeitsgedächtnis der Lernenden extrinsisch kognitiv belasten, da sie für das Verstehen der Inhalte nicht benötigt werden. Dies ist besonders der Fall, wenn auf das Bild im weiteren Verlauf der Lernmaterialien kein Bezug genommen wird. Aus diesem Grund sollte im Sinne der Cognitive Load Theorie auf einmalige dekorative Bilder verzichtet werden, wenn sie lediglich zur Verschönerung der Materialien dienen. (Vgl. Rey 2009, S. 98f.) Im Vordergrund der Cognitive Load Theorie steht die gesteuerte Wissensvermittlung, die dem Ansatz des Instruktionsdesigns verpflichtet ist. Damit werden offene Konzepte ausgeschlossen, in denen sich die Lernenden selbstständig und ohne Anleitung Inhalte aneignen sollen. Die Cognitive Load Theorie vertritt die Ansicht, durch das direktive Vorgehen können der Aufbau und die Automatisierung von Schemata gezielter gesteuert werden, was einem offenen Lernkonzept entgegensteht. (Vgl. Rey 2009, S. 48, 59)

Jedoch könnten besonders motivationale Aspekte, deren Förderung durch offene Unterrichtskonzepte im Vordergrund steht, unter dem direktiven Vorgehen der Wissensvermittlung leiden. Zudem vertritt der Ansatz der Cognitive Load Theorie die Ansicht, die Schüler könnten durch Oberflächenmerkmale von Aufgaben oder Geschichten, die einen Rahmen um

das Thema spannen, abgelenkt werden (siehe Variabilitätseffekt auf Seite 74). Stattdessen sollten die Kontexte der Aufgaben variieren, um einer Ablenkung entgegenzuwirken. Dem steht allerdings entgegen, dass Kontexte, die sich an das alltägliche Leben der Schüler richten, nicht nur einen begrifflichen Rahmen für das Lernmaterial schaffen. Ein Kontext kann sich zudem positiv auf die Motivation und das Interesse der Lernenden auswirken (vgl. Birbaumer & Schmidt 2007, S. 237; siehe auch S. 46). Die Cognitive Load Theorie lässt sich hinsichtlich der fehlenden Förderung motivationaler Aspekte kritisieren.³⁵ In diesem Zusammenhang ist auch die Kritik bezüglich des Zielfreiheitseffektes zu nennen. Während die extrinsische kognitive Belastung durch zielfreie Aufgaben reduziert wird (siehe Zielfreiheitseffekt auf Seite 62), kann das Setzen eines Ziels zu besseren Lernleistungen führen (vgl. Rey 2009, S. 112). Erhalten die Lernenden spezifische Ziele, können sie selbst überprüfen, ob diese erreicht worden sind. In diesem Zusammenhang ist Hatties Synthese von Meta-Analysen anzuführen, in der er aufzeigt, dass Ziele mit einer Effektstärke von $d=0,56$ in einem hohen Bereich anzusiedeln sind. Dabei ist nicht nur von Bedeutung, dass dem Lernenden die Ziele aufgezeigt werden, sondern dass die Lernleistung umso höher ist, je anspruchsvoller die Ziele sind. (Vgl. Hattie 2013, S. 195) Erst wenn den Lernenden das Ziel der Aufgabe bewusst ist können sie selbst einschätzen, ob sie das Ziel erreicht haben. Damit wird ein weiterer Effekt Hatties angesprochen; das Feedback, das eine hohe Effektstärke von $d=0,73$ erzielt. „Die drei wichtigsten Feedback-Fragen sind: ‚Wohin gehe ich?‘ (Lernintention/Ziele/Erfolgskriterien), ‚Wie komme ich voran?‘ (Selbstbewertung und Selbsteinschätzung) und ‚Wohin gehe ich danach?‘ (Fortschrei-

³⁵ Neben der Kritik an dem direktiven Vorgehen der Wissensvermittlung, die durch die Cognitive Load Theorie postuliert wird, werden auch weitere Überlegungen Swellers in Frage gestellt. In seinem 2004 erschienenen Aufsatz „Instructional Design Consequences of an Analogy between Evolution by Natural Selection and Human Cognitive Architecture“ vergleicht Sweller die Architektur des menschlichen Gedächtnisses mit der Evolutionstheorie, die auf natürlicher Selektion basiert. Das Langzeitgedächtnis eines Menschen vergleicht er hier mit dem genetischen Code, der die biologischen Eigenschaften einer Spezies ausmacht (vgl. S. 11f.). Gleiches bezieht er auf die Wissensbestände, die im Langzeitgedächtnis gespeichert werden und den Charakter einer Person formen. Die natürliche Selektion bezieht Sweller auf das Arbeitsgedächtnis und dessen begrenzte Speicherkapazität. Durch die Kapazitätsbegrenzung unterliegen die Informationen, die ins Langzeitgedächtnis gelangen und im Arbeitsgedächtnis verarbeitet werden, einer gewissen Selektion. (Vgl. S. 13) An dieser Stelle sollen diese theoretischen Überlegungen nicht weiter ausgeführt werden, jedoch gilt es zu erwähnen, dass dieser Ansatz von anderen Autoren nicht aufgegriffen oder weiter ausgeführt wurde (vgl. Rey 2009, S. 39f.).

ten, neue Ziele)“ (Hattie 2013, S. 210). Feedback ist nur dann effektiv, wenn es sich an diesen drei Fragen orientiert. Besonders in der ersten Feedback-Frage, dem Feed up, wird mit dem Ziel, das erreicht werden soll, auch gleichzeitig ein Erfolgskriterium festgelegt. (Vgl. Hattie 2013, S. 206ff.; Zierer 2014, S. 64ff.) Ist den Lernenden jedoch das Ziel einer Aufgabe nicht bewusst, kann dies zu Unsicherheiten bei den Lernenden (auch hinsichtlich der ersten Feedback-Frage) führen.

Dennoch können die einzelnen Effekte der Cognitive Load Theorie als empirisch gesichert angesehen werden (vgl. Rey 2009, S. 48). Wie auch hier dargelegt, wurden sie in mehreren Studien überprüft; sie liefern Prognosen zu Lernprozessen und Gestaltungsempfehlungen für die Praxis.

Der *Weniger ist mehr*-Gedanke der Cognitive Load Theorie bezieht sich auch auf die Informationsdichte im Lernmaterial. In diesem Zusammenhang lässt sich die Konzeption von Texten anführen. Mit weiteren allgemeinen Gestaltungsmaßnahmen von Lernmaterialien, die nicht direkt aus Studien der Cognitive Load Theorie entstammen, beschäftigt sich das nächste Kapitel. Insbesondere wird auf die Gestaltung von lernförderlichen Texten und Aufgaben eingegangen.

3.4 Allgemeine Gestaltungsmaßnahmen

Die zuvor beschriebenen Effekte der Cognitive Load Theorie zur Steuerung der kognitiven Belastung zielen auf die Gestaltung von Lernmaterialien ab und liefern dazu empirisch überprüfte Hinweise. Daneben gibt es weitere Gestaltungsmaßnahmen, die nicht aus diesen Studien stammen, aber dennoch Überschneidungen mit den allgemeinen Konzepten der Cognitive Load Theorie haben. Demnach beschäftigen sich Textverständlichkeitskonzepte mit dem schriftlichen Erklären und versuchen, textliche Inhalte für eine Adressatengruppe verständlich und lernförderlich darzustellen. Zudem können unnötige Erschwernisse innerhalb von Aufgabenstellungen zu einer erhöhten extrinsischen Belastung führen und damit ein Lernen erschweren.

3.4.1 Konzeption verständlicher Texte

Ein gezielter Aufbau von Schemata kann nur erfolgen, wenn die Lernenden die Inhalte verstehen. Dabei spielen Texte eine entscheidende Rolle. Die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses kann nur dann umgangen werden,

wenn die Informationen in den Texten verständlich dargestellt werden, womit ein Rückbezug auf die Überlegungen zur Cognitive Load Theorie erfolgt.

Mit der Beschaffenheit verständlicher Texte beschäftigt sich das *Hamburger Verständlichkeitskonzept*, das erstmals 1974 von Langer, Schulz von Thun & Tausch formuliert wurde. Sie richten dabei den Blick auf schriftlich-sprachliche Gestaltungsmerkmale, die beim Leser das Verstehen und Behalten der Inhalte unterstützen. Sie vernachlässigen in ihren Untersuchungen Strategien, die ein Leser anwendet, um den Inhalt eines Textes zu verstehen. Damit ist beispielsweise das Unterstreichen neuer Informationen oder das Herausschreiben unbekannter Fachbegriffe gemeint. (Vgl. Schulz von Thun 1976, S. 101ff.)

Die Verständlichkeit von Texten kann durch vier Dimensionen erhöht werden. Diese Gestaltungsmerkmale werden daher auch als *vier Dimensionen der Textverständlichkeit* bezeichnet (vgl. Schulz von Thun 1976, S. 104; Langer, Schulz van Thun & Tausch 2006, S. 22ff.; siehe auch Wellenreuther 2010, S. 184f.; Rey 2009, S. 83ff.):

- 1. Einfachheit:** Die Texte sollen in einfacher Sprache mit größtenteils bekannten Wörtern verfasst sein. Fremdwörter oder Fachbegriffe sollen innerhalb des Textes verständlich erklärt werden. Ein Suchen nach der Bedeutung eines unbekanntes Wortes, dessen Bedeutung nicht im Text erklärt wird, kann die Schüler extrinsisch kognitiv belasten. Zudem sollen kurze Sätze verwendet werden. Um dieser ersten Dimension gerecht zu werden und die Einfachheit eines Textes zu gewährleisten, sollte auf eine komplizierte Ausführung der Inhalte, beispielsweise durch verschachtelte Sätze, verzichtet werden. Der Verzicht auf unnötige Erschwernisse innerhalb von Texten deckt sich mit dem *Weniger ist mehr*-Gedanken der Cognitive Load Theorie, indem die extrinsische kognitive Belastung reduziert wird.
- 2. Gliederung - Ordnung:** Dieses Merkmal bezieht sich auf die innere Ordnung, mit einer geordneten und schlüssigen Abfolge der dargestellten Informationen, und die äußere Gliederung des Textes, die mittels Überschriften, Zwischenüberschriften und Absätzen erzielt werden kann. Durch die Gliederung - Ordnung wird ein roter Faden des Textes geschaffen, sodass auch Vorbemerkungen und abschließende Zusammenfassungen wichtig sind. In diesem Zusammenhang

kann auch das Erstellen eines Advance Organizers als Vorstrukturierung und Ordnung der Inhalte angeführt werden.

3. Kürze - Prägnanz: Der Leser soll durch den Text das Wesentliche erfassen können, indem sich der Text auf die Kernaussagen beschränkt. Auf weitschweifige Umschreibungen, durch die vom eigentlichen Thema abgelenkt wird oder die aus inhaltslosen Passagen bestehen, sollte verzichtet werden. Die Kürze-Prägnanz zeichnet sich durch den „*Sprachaufwand im Verhältnis zum Informationsziel*“ (Schulz von Thun 1976, S. 104) aus. Der Verzicht auf weitschweifige Erklärungen kann mit dem Redundanzeffekt der Cognitive Load Theorie erklärt werden: Wird unnötig auf zu viele Einzelheiten innerhalb eines Textes eingegangen, können dadurch lernhinderliche Redundanzen entstehen, durch die der Leser extrinsisch kognitiv belastet wird.

4. Zusätzliche Stimulanz / Anregende Zusätze: Durch anregende Zusätze wie wörtliche Rede und alltagsnahe Beispiele soll der Leser direkt angesprochen und zum Mitdenken angeregt werden.

Die vier Dimensionen der Textverständlichkeit stehen in Wechselwirkung zueinander. „[D]ie beiden wichtigsten ‚Verständlichmacher‘“ (Schulz von Thun 1976, S. 104) sind die Dimensionen Einfachheit und Gliederungs-Ordnung und diese sollten beim Schreiben von Texten besondere Beachtung finden. Für die dritte Verständlichkeitsdimension Kürze-Prägnanz sollte ein Mittelmaß gefunden werden: Zu kurze Ausführungen können ebenso unverständlich für den Leser sein wie zu lange und weitschweifige Darstellungen. Die Zusätzliche Stimulanz und damit das Einbringen von anregenden Zusätzen in den Text ist abhängig von den anderen drei Verständlichkeitsdimensionen. Anregende Zusätze können nur dann zur Verständlichkeit beitragen und den Leser zum Mitdenken anregen, wenn die anderen drei Merkmale optimal angewendet wurden. Ist der Text kompliziert und beschränkt sich nicht auf das Wesentliche, können anregende Zusätze den Leser extrinsisch kognitiv belasten. (Vgl. Schulz von Thun 1976, S. 104; Rey 2009, S. 83ff.)

3.4.2 Aufgabenkonzeption

Besonders hinsichtlich der zweiten Phase des Lernens, in der die Festigung, Verankerung und Automatisierung von Informationen im Vorder-

grund steht, spielen Aufgaben eine zentrale Rolle. Dem Bearbeiten von Aufgaben kommt eine doppelte Funktion zu: Einerseits werden dadurch Lernprozesse angeregt und andererseits kann eine Steuerung und Überprüfung des Leistungsstandes erfolgen, wodurch gleichzeitig das Erreichen der Lernziele festgestellt werden kann. (Vgl. Wellenreuther 2011, S.9; 31ff.; Niegemann et al. 2008, S.311) An dieser Stelle soll auf die unterschiedlichen Typen und die Konzeption von Aufgaben eingegangen werden. Einige der ausgeführten Effekte der Cognitive Load Theorie befassen sich mit der Lernförderlichkeit durch Aufgaben, genauer: der Zielfreiheitseffekt, der Effekt vollständig ausgearbeiteter Lösungsbeispiele, der Aufgabenergänzungseffekt, der Effekt der abschwächenden Unterstützung, der Variabilitätseffekt und bedingt auch der Aufmerksamkeitsteilungseffekt.

Aufgaben können und sollten in jedem Abschnitt des Lernprozesses eingesetzt werden. So kann beispielsweise das Vorwissen mittels einer Aufgabe aktiviert werden oder auch zum Wissenserwerb, indem durch die Aufgabe eine vertiefte Auseinandersetzung mit dem Lernstoff stattfindet. Durch eine gute Platzierung der Aufgaben kann der Lernende eigenständig seinen Leistungsstand überprüfen und damit den Lernprozess regulieren, was besonders dann von Bedeutung ist, wenn der Lernende auf sich alleine gestellt ist und keine entsprechenden Hilfestellungen von einer Lehrkraft gegeben werden können. (Vgl. Niegemann et al. 2008, S.311f.) Generell können drei verschiedene Aufgabenarbeiten voneinander unterschieden werden (vgl. Niegemann et al. 2008, S.315ff.):

Geschlossene Aufgaben zeichnen sich durch feste Antworten für den Lernenden aus. Der Lernende wählt zwischen verschiedenen Antwortmöglichkeiten, wie es bei Multiple-Choice-Aufgaben (Mehrfachauswahlaufgaben), Alternativaufgaben und Zuordnungsaufgaben der Fall ist. Diese Aufgaben dienen hauptsächlich zum Abfragen von Faktenwissen und können zudem genutzt werden, um kritisches Denken und Problemlöseprozesse zu unterstützen. Die Konzeption dieses Aufgabentypus unterliegt gewissen Regeln: Eine Multiple-Choice-Aufgabe besteht aus einem Aufgabenstamm und mehreren Antwortmöglichkeiten, wobei die Anzahl der Wahlmöglichkeiten die Chance des Rätens beeinflusst. Bei vier Antwortmöglichkeiten mit nur einer richtigen Antwort liegt demnach die Chance bei 25 Prozent, die richtige Antwort zu erraten. (Vgl. Niegemann et al. 2008, S.316f.)

Bei der Formulierung von Mehrfachauswahlaufgaben gilt es zu beachten, dass der Aufgabenstamm aus einer Frage oder einem unvollständigen Satz besteht. Der Aufgabenstamm muss so konzipiert sein, dass auf die Wiederholung eines bestimmten Wortes innerhalb der einzelnen Antwortmöglichkeiten verzichtet werden kann. Wenn es sich um eine negative Auswahl durch den Lernenden handelt, so sollte dies beispielsweise durch ein Unterstreichen hervorgehoben werden. Die Antwortmöglichkeiten müssen nicht nur grammatikalisch auf den Aufgabenstamm angepasst sein, zudem sollten auch die falschen Antworten (Distraktoren) für diejenigen sinnvoll erscheinen, die das abzufragende Wissen nicht beherrschen. Allerdings ist hier die Anpassung des Schwierigkeitsgrades wichtig: Die Distraktoren sollten weder zu weit über noch unter dem kognitiven Leistungsniveau der Lernenden liegen, sondern die Zone der nächsten Entwicklung bedienen (siehe Seite 56). Zu schwierige oder zu leichte Distraktoren werden zumeist von Lernenden automatisch ausgeschlossen. Antworten, die sich gegenseitig bedingen, sollten ebenfalls vermieden werden. Handelt es sich um das Abfragen der Definition eines Begriffs, sollte dieser in dem Aufgabenstamm genannt werden und die Antwortmöglichkeiten sollten aus den verschiedenen Definitionen bestehen. (Vgl. Herbig 1976, S. 60)

Halboffene Aufgaben zeichnen sich dadurch aus, dass dem Lernenden die Antwort nicht bekannt ist. Der Auswerter der Aufgabe hingegen kennt das passende Antwortformat. Die Beantwortung der Aufgabe erfolgt durch das Ergänzen eines Satzes oder das Formulieren einer kurzen Antwort. Aus diesem Grund werden halboffene Aufgaben auch als *Short-Answer-Formate* bezeichnet. Oftmals wird das Faktenwissen oder es werden mathematische Fähigkeiten erfasst, ohne dass ein Hinweis auf eine Antwort gegeben wird. Lückentexte und Satzergänzungsaufgaben sind Formen dieses Aufgabentypus. Im Gegensatz zu den Mehrfachauswahlaufgaben kann als vorteilhaft herausgestellt werden, dass die Chance geringer ist, die korrekte Antwort zu erraten. (Vgl. Niegemann et al. 2008, S. 320f.)

Bei der Gestaltung halboffener Aufgaben sollte darauf geachtet werden, dass diese durch ein einziges Wort, einen Satz oder eine Zahl beantwortet werden können. Insofern sich die Aufgabe auf einen vorigen Text bezieht, sollte der zu ergänzende Satz nicht wortgleich

aus diesem Text stammen. Die Frage muss hinsichtlich einer genau definierten Antwort erfolgen und für die Antwort muss ausreichend Platz zur Verfügung stehen. Bei Aufgaben, die von den Lernenden rechnerisch gelöst werden, sollte der Grad der Genauigkeit mit angegeben werden. (Vgl. Herbig 1976, S. 59) Bei halboffenen Aufgaben sollte pro Aufgabe eine Antwort gegeben werden, wobei Lückentexte hier eine Sonderform darstellen, durch die zusammenhängende Inhalte abgefragt werden können (vgl. Niegemann et al. 2008, S. 321). Wird ein Lückentext als Aufgabe gewählt, muss der Sinn des Textes trotz der Lücken erhalten bleiben. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass die Lücken nicht zu schnell aufeinander folgen dürfen. (Vgl. Herbig 1976, S. 59)

Offene Aufgaben zeichnen sich dadurch aus, dass die Lernenden eine freie Antwort formulieren. Dieser Aufgabentypus wird mittels eines Erwartungshorizontes ausgewertet. Dabei gibt es nicht zwangsläufig eine korrekte Antwort, vielmehr steht die Argumentationsstärke im Vordergrund. Zu dieser Aufgabenform zählen beispielsweise Erörterungen, Nacherzählungen und Diskussionsaufgaben. Sie dienen dazu, Prozesswissen zu testen oder Einstellungen der Lernenden hinsichtlich einer bestimmten Thematik zu erfragen. Die Auswertung dieser Aufgaben ist besonders im Vergleich zu den geschlossenen oder halboffenen Aufgaben schwierig. (Vgl. Niegemann et al. 2008, S. 322)

Generell sollte bei der Konzeption von Aufgaben beachtet werden, dass die Lernenden nicht unnötig extrinsisch kognitiv belastet werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, einen eindeutigen Arbeitsauftrag zu formulieren, indem aus der Aufgabenstellung ersichtlich wird, was genau in der Aufgabe zu tun ist. Dafür ist die Verwendung klarer und geläufiger Wörter und das Vermeiden verschachtelter Sätze von zentraler Bedeutung. Ebenso sollten keine nutzlosen Füllwörter verwendet werden. Aus der Aufgabenstellung sollten alle nötigen Informationen hervorgehen, die für die korrekte Beantwortung benötigt werden. Sowohl eine übertriebene Genauigkeit als auch eine oberflächliche Ungenauigkeit sollten in der Aufgabenstellung und der Antwort vermieden werden. Auch absichtlich falsche Darstellungen und verdeckte Hinweise belasten das Arbeitsgedächtnis unnötig, weil dadurch der Schwierigkeitsgrad durch die Kompliziertheit der Aufgabenstellung erhöht wird. (Vgl. Herbig 1976, S. 58f.) Diese Kriterien weisen Parallelen

zu den vier Verständlichkeitsdimensionen des Hamburger Verständlichkeitskonzepts auf. Dementsprechend können diese auf die Konzeption von Aufgaben übertragen werden, sodass Aufgabenstellungen den Dimensionen Einfachheit, Gliederung - Ordnung, Kürze - Prägnanz und Anregende Zusätze entsprechen sollen. Dadurch lässt sich die extrinsische kognitive Belastung seitens der Lernenden reduzieren, um genügend freie Kapazitäten für eine hohe lernrelevante kognitive Belastung zu schaffen. Dadurch können sich die Lernenden auf den Inhalt der Aufgabe konzentrieren.

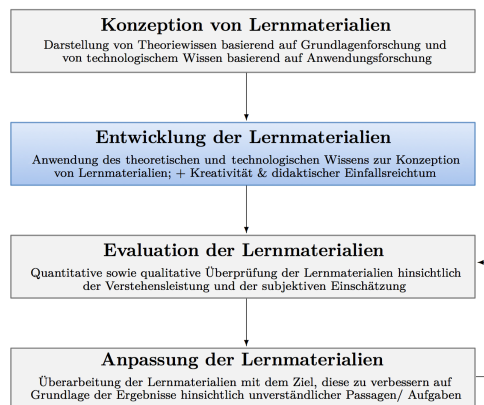
Der Schwierigkeitsgrad sollte an die Fähigkeiten der Lernenden und an den Zweck der Aufgabe angepasst sein (vgl. Herbig 1976, S. 59). Demnach sollte die Aufgabenstellung weder trivial noch zu schwierig sein, da die Lernenden ansonsten unterfordert beziehungsweise überfordert werden. An dieser Stelle lässt sich auf die Zone der nächsten Entwicklung verweisen, die im Zusammenhang mit der Aufgabenschwierigkeit und der Expertise der Lernenden steht (siehe Seite 56). Mit der Aufgabenschwierigkeit wird die intrinsische kognitive Belastung der Lernenden beeinflusst.

Kapitel 4

Entwicklung der Lernmaterialien

Auf den theoretischen Überlegungen zur Konzeption von Lernmaterialien aufbauend soll in diesem Kapitel auf die konkrete Entwicklung der Lernmaterialien eingegangen werden.

Bezugnehmend auf den nebenstehenden skizzierten Ablauf beschreibt die Entwicklung der Lernmaterialien den zweiten Schritt. Sowohl das Theoriewissen als auch das Technologische Wissen zur Konzeption von Lernmaterialien sollen innerhalb der Entwicklung dieser angewendet werden, um die Materialien in dem dritten und nächsten Schritt zu evaluieren.



Die Lernmaterialien beschäftigen sich inhaltlich mit dem Thema **geometrische Optik**. Aus diesem Grund wird zunächst der fachliche Hintergrund geklärt, um in einem zweiten Schritt auf die lernförderliche Gestaltung der Materialien einzugehen. Dazu findet eine Legitimierung des Themas sowohl auf curricularer als auch auf der Interessenebene statt. Außerdem werden mögliche Schwierigkeiten beim Verstehen der Inhalte thematisiert, um abschließend die konkrete Entwicklung der Lernmaterialien zu beschreiben.

4.1 Fachlicher Hintergrund - Geometrische Optik

Das Thema **geometrische Optik** ist als ein Teilbereich des Themengebiets **Optik** zu verstehen. Ausgangspunkt für die Betrachtung der Phänomene in der geometrischen Optik ist das Licht. Dabei kann das natürliche Licht der Sonne von künstlichen Lichtquellen unterschieden werden. Zunächst werden die Natur des Lichts und dessen Ausbreitung sowie die Reflexion und Brechung beschrieben. Im Anschluss daran rückt die Abbildung durch Linsen in den Vordergrund. Dazu wird die Brechung von Licht an Kugelflächen betrachtet. Darauf aufbauend lässt sich die Bildentstehung durch Sammell- und Zerstreuungslinsen beschreiben.

Als ein optisches Instrument wird das menschliche Auge und dessen Aufbau dargestellt. In diesem Zusammenhang lässt sich der Sehvorgang verdeutlichen und es wird zudem auf Sehschwächen und deren Korrektur eingegangen.

4.1.1 Ausbreitung, Reflexion und Brechung von Licht

Die Natur des Lichts lässt sich auf zwei Ebenen betrachten. Auf atomarer Ebene lassen sich die Phänomene des Lichts nur mit Hilfe der Quantenmechanik erklären, sodass Licht in Form von Photonen (Quanten) auftritt, die zugleich Wellen- als auch Teilchencharakter besitzen. Auf mesoskopischer Ebene gibt es Phänomene, die sich entweder mit den Wellen- oder mit den Teilcheneigenschaften des Lichts erklären lassen. Aus diesem Grund wird in der klassischen Physik vom Welle-Teilchen-Dualismus gesprochen. (Vgl. u.a. Meschede 2015, S. 672f.; Stolz 2005, S. 79ff.)

Für die Überlegungen zur geometrischen Optik – und damit auf mesoskopischer Ebene – ist es völlig ausreichend, das Licht als Welle zu verstehen. Dabei wird in der geometrischen Optik für die Wellenlänge λ des Lichts von dem Grenzfall ausgegangen, dass $\lambda \rightarrow 0$. Aus diesem Grund können Beugungs- und Interferenzerscheinungen vernachlässigt werden. (Vgl. Fließbach 2012, S. 352)

Lichtausbreitung

Wird eine Lichtquelle als ein Punkt betrachtet, breitet sich das Licht um diese Punktquelle als Kugelwelle aus.

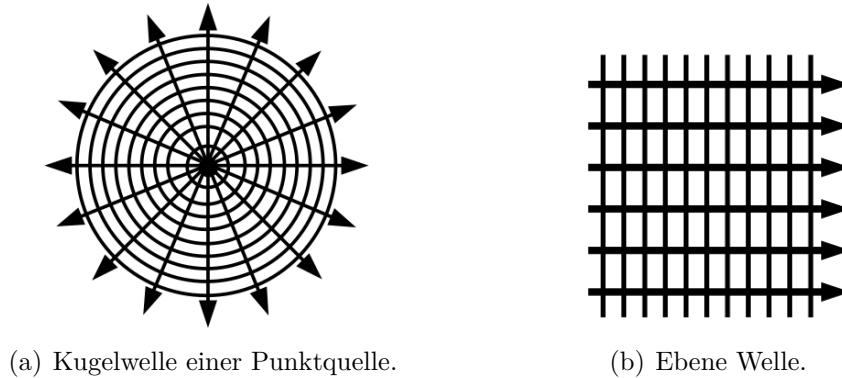


Abbildung 4.1: Wellenfronten (–) und Strahlen (→) einer Kugelwelle und einer daraus resultierenden ebenen Welle ausgehend von einer Punktquelle.³⁶

Senkrecht auf den Wellenfronten, die in (a) als Kreise dargestellt sind, stehen die Strahlen (Pfeile), die sich in alle Richtungen ausbreiten. Ist die Punktquelle sehr weit entfernt und wird nur ein Ausschnitt der Kugelwelle betrachtet (indem beispielsweise eine Lochblende verwendet wird), kann sie als ein paralleles Bündel beziehungsweise als ebene Welle, wie in (b) dargestellt, angesehen werden. Die ebene Welle wird als **geradlinig** bezeichnet, wenn sie nicht durch ein Hindernis abgelenkt wird. Die zueinander parallel stehenden Strahlen verlaufen senkrecht zu den Wellenfronten. Dementsprechend kann das Licht der Sonne ebenfalls als geradlinig angesehen werden. (Vgl. Meschede 2015, S. 498)

Reflexion und Brechung

Die **Reflexion** eines Lichtstrahls an der Grenzfläche zweier Medien wird oftmals mit dem elastischen Stoß einer Kugel verglichen. Dabei gilt, dass der Einfallswinkel α gegen das Lot gleich dem Ausfallswinkel α' ist (vgl. Meschede 2015, S. 499):

$$\alpha = \alpha' \quad (4.1)$$

An der Grenzfläche von zwei Medien wird nicht nur ein Teil des einfallenden Lichtstrahls reflektiert, es wird zudem ein Teil des Lichtstrahls unter Richtungsänderung transmittiert. Dieses Phänomen wird als

³⁶ Abbildung aus Gerthsen, Kneser & Vogel 1989, S. 453.

Brechung (Refraktion) des Lichts bezeichnet und der Lichtstrahl wird beim Eintritt in das zweite Medium mit dem Brechungswinkel β gegen das Lot gebrochen. Dies lässt sich besonders gut an der Grenzfläche von Luft und Wasser beobachten. (Vgl. Fließbach 2012, S. 339ff.)

Die Richtungsänderung und damit die Brechung von Licht liegt in der Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit c des Lichts beim Übergang von dem ersten zum zweiten Medium begründet. Dies lässt sich durch folgende Beziehung verdeutlichen:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad (4.2)$$

Dabei sind α der Winkel des einfallenden Lichtstrahls und β der Brechungswinkel gegen das Lot (siehe Abbildung 4.2). Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den beiden Medien sind durch c_1 und c_2 ausgedrückt. Der Brechungsindex n eines Mediums lässt sich ebenfalls durch diese Beziehung ausdrücken:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \quad (4.3)$$

Gleichung (4.3) bezieht sich auf den Übergang vom Vakuum zu einem beliebigen Medium. Für den Übergang zwischen zwei Medien mit festgesetzten Brechzahlen gilt:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (4.4)$$

Die Brechzahl n ist als eine Materialkonstante zu verstehen und beträgt beispielsweise für Luft $n_{Luft} = 1,0$, für Wasser $n_{Wasser} = 1,3$ und für Glas $n_{Glas} = 1,5$. Je höher der Brechungsindex eines Mediums, desto *optisch dichter* ist es. In diesem Fall sind Wasser und Glas optisch dichter als Luft. (Vgl. Meschede 2015, S. 500ff.)

4.1.2 Abbildung durch Linsen

Optische Linsen und besonders deren Kombination beeinflussen die Möglichkeiten der optischen Abbildung, Vergrößerung und Fernsicht immens.

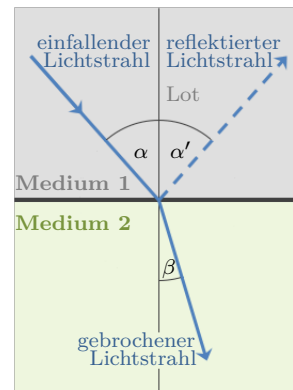


Abbildung 4.2: Reflexion und Brechung eines Lichtstrahls an der Grenzfläche zweier Medien.³⁷

³⁷ Abbildung modifiziert aus Fließbach 2012, S. 340.

Zahlreiche optische Geräte wie die Brille, das Mikroskop oder der Fotoapparat basieren auf Linsensystemen. Linsen werden so geschliffen, dass ihre Oberfläche eine homogene Krümmung besitzt. Bisher wurde die Brechung von Licht an einer ebenen Grenzfläche zwischen zwei Medien (siehe Abbildung 4.2) betrachtet. Die Abbildung von Linsen beruht jedoch auf der Brechung von Licht an gekrümmten Grenzflächen, sodass dieser Vorgang im Folgenden verdeutlicht werden soll. (Vgl. Demtröder 2013, S. 270)

Brechung von Licht an gekrümmten Flächen

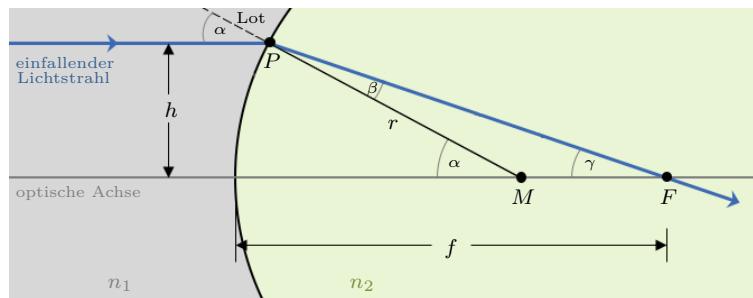


Abbildung 4.3: Bestimmung der Brennweite einer sphärisch gekrümmten Grenzfläche.³⁸

Eine Fläche wird als *sphärisch* gekrümmt bezeichnet, wenn sie mit einem Kugelausschnitt verglichen werden kann und einen Mittelpunkt M sowie einen Radius r besitzt. Fällt ein Lichtstrahl, der im Abstand h parallel zur optischen Achse verläuft, auf eine sphärisch gekrümmte Fläche, wird dieser im Punkt P gebrochen. Der Einfallswinkel zum Lot wird auch hier wieder mit α bezeichnet und der Brechungswinkel mit β (siehe auch Abbildung 4.2). Die beiden durch die sphärisch gekrümmte Grenzfläche getrennten Medien besitzen die Brechungsindizes n_1 und n_2 , für die gilt: $n_2 > n_1$. Der gebrochene Lichtstrahl verläuft auch durch das zweite Medium geradlinig und schneidet die optische Achse im *Brennpunkt* F mit dem Winkel γ . (Vgl. ebd.) Für diesen gilt:

$$\gamma = \alpha - \beta \quad (4.5)$$

Der Abstand vom Brennpunkt F zur Grenzfläche wird als *Brennweite* f bezeichnet. Der Brennpunkt F und die Brennweite f sind charakteristisch für eine sphärisch gekrümmte Grenzfläche, weil sich im Brennpunkt F alle gebrochenen Lichtstrahlen treffen. Die Brennweite f lässt sich über

³⁸ Abbildung aus Demtröder 2013, S. 270.

die Beziehung der Winkel α und γ zum Abstand h des Lichtstrahls zur optischen Achse in Abhängigkeit vom Krümmungsradius r beschreiben:

$$h = r \cdot \sin \alpha = f \cdot \sin \gamma \quad (4.6)$$

Mit der Winkelbeziehung aus Gleichung (4.5) ergibt sich daraus:

$$f = r \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \beta)} \quad (4.7)$$

Nach dem Brechungsgesetz in Gleichung (4.4) lässt sich für f näherungsweise für kleine Winkel schreiben:

$$f = r \cdot \left(\frac{n_1}{n_2 - n_1} \right) \quad (4.8)$$

Lässt sich der Ausgangspunkt des Lichtstrahls bestimmen, weil dieser von einem Gegenstand A ausgeht bzw. reflektiert wird, ist auch der *Bildpunkt* B in Abhängigkeit von der Brennweite festgesetzt. (Vgl. Demtröder 2013, S. 270; Meschede 2015, S. 505) Die Position des Bildpunktes B lässt sich, wie in folgender Abbildung 4.4, geometrisch konstruieren:

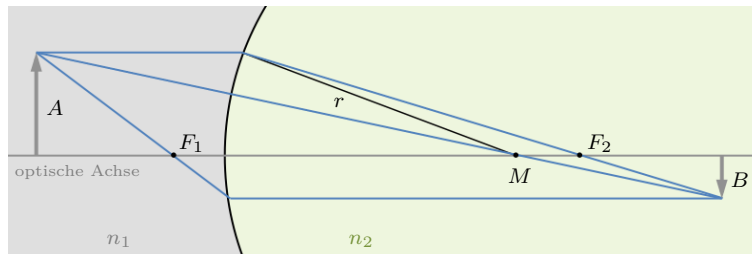


Abbildung 4.4: Geometrische Strahlenkonstruktion bei der Abbildung eines Gegenstandspunktes A durch eine sphärisch gekrümmte Fläche.³⁹

Zur Bestimmung des Bildpunktes B müssen mindestens zwei Teilstrahlen konstruiert werden: Der erste Teilstrahl verläuft in Medium 1 parallel zur optischen Achse und schneidet diese im Brennpunkt F_2 in Medium 2. Der zweite Teilstrahl verläuft durch den Krümmungsmittelpunkt M und wird aufgrund des senkrechten Eintreffens auf die sphärisch gekrümmte Grenzfläche nicht an dieser gebrochen. Am Schnittpunkt dieser beiden Teilstrahlen befindet sich der Bildpunkt B . Der dritte Teilstrahl wird vom Bildpunkt B ausgehend in Medium 2 parallel zur optischen Achse gezeich-

³⁹ Abbildung aus Demtröder 2013, S. 270.

net und schneidet diese in Medium 1 im *gegenstandsseitigen Brennpunkt* F_1 . (Vgl. Demtröder 2013, S. 270)

Aus Abbildung 4.4 wird deutlich, dass der Bildpunkt durch die geometrisch konstruierten Strahlenverläufe ein reell umgekehrtes Bild des Gegenstandes darstellt.

Dünne Linsen

Linsen werden aus durchsichtigem Material gefertigt und besitzen mindestens auf einer Seite eine sphärisch gekrümmte Fläche mit einem festgesetzten Krümmungsradius r . Ist die Wölbung in Richtung der Lichtquelle ausgeprägt, wird der Krümmungsradius r mit einem positiven Vorzeichen versehen. In der nebenstehenden Abbildung 4.5 wird davon ausgegangen, dass sich die Lichtquelle auf der linken Seite befindet. Ist die Wölbung in die entgegengesetzte Richtung ausgeprägt, wie im rechten Teil der Abbildung 4.5, wird der Krümmungsradius mit einem negativen Vorzeichen versehen. (Vgl. Demtröder 2013, S. 271; Meschede 2015, S. 505f.) Es lassen sich verschiedene Linsenformen voneinander unterscheiden:

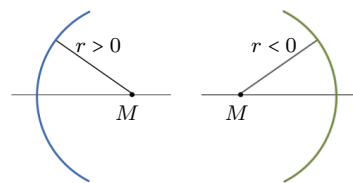
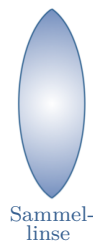


Abbildung 4.5: Krümmungsradien mit verschiedenen Vorzeichen.⁴⁰

Eine *Sammellinse* ist in der Mitte dicker, weil sie sich durch mindestens eine nach außen gewölbte Grenzfläche auszeichnet. Für die Krümmungsradien der Grenzflächen der abgebildeten Sammellinse gilt: $r_{links} > 0$, $r_{rechts} < 0$. Wenn sich eine Linse zwischen der Linsengrenzfläche und dem Krümmungsmittelpunkt befindet, wird die Grenzfläche als *konvex* bezeichnet. Die abgebildete Sammellinse ist eine *bikonvexe* Linsenform, da beide Grenzflächen konvex sind. (Vgl. ebd.)



Sammel-
linse

Eine *Zerstreuungslinse* ist am Rand dicker als in der Mitte, weil mindestens eine der Linsengrenzflächen nach innen gewölbt ist. Für die Krümmungsradien der Grenzflächen der abgebildeten Zerstreuungslinse gilt: $r_{links} < 0$, $r_{rechts} > 0$. Eine Linsengrenzfläche wird als *konkav* bezeichnet, wenn sich diese zwischen dem Krümmungsmittelpunkt und der Linse befin-



Zerstreuungs-
linse

⁴⁰ Abbildung aus Demtröder 2013, S. 271.

det. Beide Grenzflächen der abgebildeten Zerstreuungslinse sind konkav, womit diese Linsenform *bikonkav* ist. (Vgl. ebd.)

Treffen Lichtstrahlen auf eine Linse, werden diese an beiden Linsengrenzflächen gebrochen. An einer von Luft umgebenen Linse aus Glas wird ein auftreffender Lichtstrahl zunächst an der ersten Grenzfläche, beim Übergang von Luft (Medium 1) mit $n_1 = 1,0$ zu Glas (Medium 2) mit $n_2 = 1,5$, gebrochen. Innerhalb der Linse pflanzt sich der Lichtstrahl homogen fort und wird erst an der zweiten Grenzfläche von Glas ($n_2 = 1,5$) zu Luft ($n_3 = n_1 = 1,0$) erneut gebrochen. Bei **dünnen Linsen**⁴¹ ist der Weg des Lichtstrahls innerhalb der Linse sehr kurz und aus diesem Grund ist es näherungsweise erlaubt, die beidseitige Brechung zu vernachlässigen. Stattdessen wird bei der geometrischen Strahlenkonstruktion davon ausgegangen, dass die Lichtstrahlen einmalig in der Linsenmitte gebrochen werden. Dünne Linsen stellen somit eine Idealisierung realer Linsen dar. (Vgl. Meschede 2015, S. 507; Demtröder 2013, S. 272)

Für eine dünne Sammellinse kann der Strahlenverlauf entsprechend einer sphärisch gekrümmten Grenzfläche mit positivem Krümmungsradius (siehe Abbildung 4.4) konstruiert werden:

Der erste Teilstrahl (blau) verläuft vor der Linse parallel zur optischen Achse, wird an der Linsenmitte gebrochen und verläuft hinter der Linse durch den Brennpunkt F_2 . Der zweite Teilstrahl (grün) verläuft, ohne an der Linsenmitte gebrochen zu werden, durch den Linsenmittelpunkt und schneidet hier die optische Achse. Der zweite Teilstrahl wird auch *Mittelpunktstrahl* oder *Zentralstrahl* genannt. Der dritte

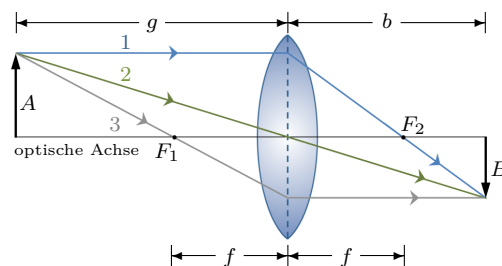


Abbildung 4.6: Geometrische Strahlenkonstruktion bei der Abbildung eines Gegenstandspunktes A durch eine Sammellinse.⁴²

Teilstrahl wird auch *Mittelpunktstrahl* oder *Zentralstrahl* genannt. Der dritte Teilstrahl (grau) – der zur Bestimmung des Bildpunktes B unwichtig ist, aber zur Bestimmung des gegenstandsseitigen Brennpunktes F_1 benötigt wird – verläuft vor der Linse durch den Brennpunkt F_1 , wird wie der erste Teilstrahl an der Linsenmitte gebrochen und verläuft hinter der Linse parallel zur optischen Achse. An dem Punkt, an dem sich die drei Teilstrahlen

⁴¹ Für eine dünne Linse gilt, dass der Abstand der beiden Grenzflächen zueinander sehr klein gegen die Brennweite ist.

⁴² Abbildung aus Demtröder 2013, S. 273 und Meschede 2015, S. 506.

treffen, entsteht ein scharfer Bildpunkt B des Gegenstandspunktes A . Die Abstände des Gegenstandspunktes A und des Bildpunktes B zur Linsenmitte sind durch die *Gegenstandsweite* g und die *Bildweite* b festgelegt. Die Beziehung der Brennweite f (Abstand des Brennpunktes F_1 oder F_2 zur Linsenmitte) zu der Gegenstandsweite g und der Bildweite b lässt sich durch die Abbildungsgleichung ausdrücken:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \quad [1/m] \quad (4.9)$$

Sammellinsen besitzen eine positive Brechkraft. Die Brechkraft D einer Linse lässt sich durch die reziproke Brennweite ausdrücken und wird in der Einheit *Dioptrie* angegeben:

$$D = \frac{1}{f} \quad [dpt] \quad (4.10)$$

Für jeden abgebildeten Punkt lassen sich die drei Teilstrahlen wie in Abbildung 4.6 konstruieren. Für das Abbild eines gesamten Gegenstandes, z. B. das einer Kerze, lassen sich die Teilstrahlen zusammenfassen, indem jeweils der erste Teilstrahl für den obersten und den untersten Punkt des Gegenstandes gezeichnet wird.

Eine Sammellinse hat die Eigenschaft, dass sie die auftreffenden Lichtstrahlen in einem Punkt, dem Brennpunkt, sammelt. Durch nebenstehende Abbildung 4.7 wird auch deutlich, dass ein reell umgekehrtes Abbild der Kerze entsteht. (Vgl.

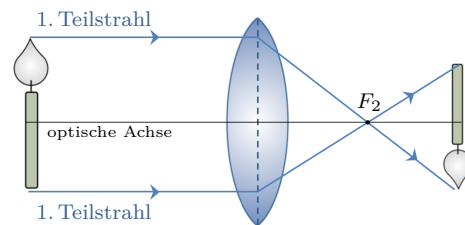


Abbildung 4.7: Abbildung eines Gegenstandes durch eine Sammellinse.⁴³

Demtröder 2013, S. 272f.; Meschede 2015, S. 505ff.; Stolz 2005, S. 73)

Eine Zerstreuungslinse hat dagegen die Eigenschaft, die eintreffenden Lichtstrahlen zu zerstreuen. Für die Konstruktion des Bildpunktes B eines Gegenstandspunktes A sind ebenfalls zwei Teilstrahlen wichtig. Der erste Teilstrahl (blau) verläuft wieder parallel zur optischen Achse und wird an der Linsenmitte, wie in Abbildung 4.8 dargestellt, gebrochen.

⁴³ Abbildung in Anlehnung an Stolz 2005, S. 73.

Die Verlängerung des gebrochenen ersten Teilstrahls (blau gestrichelt) schneidet die optische Achse im gegenstandsseitigen Brennpunkt F_1 . Der zweite Teilstrahl (grün) verläuft wieder als Mittelpunktstrahl durch die Linsenmitte – ohne an dieser gebrochen zu werden – und schneidet auch hier die optische Achse. Äquivalent zur Bildkonstruktion

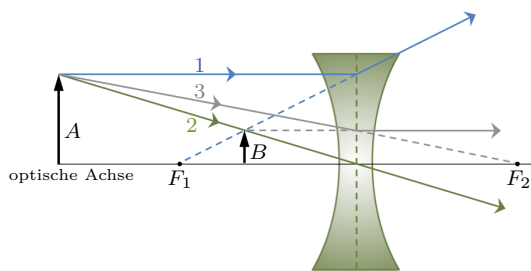


Abbildung 4.8: Geometrische Strahlenkonstruktion bei der Abbildung eines Gegenstandspunktes A durch eine Zerstreuungslinse.⁴⁴

bei einer Sammellinse, entsteht beim Schnittpunkt der ersten beiden Teilstrahlen ein scharfer Bildpunkt B des Gegenstandspunktes A . Bei einer Zerstreuungslinse schneiden sich die Teilstrahlen jedoch nicht hinter der Linse, sondern zwischen dem Gegenstandspunkt A und der Linse. Zerstreuungslinsen besitzen im Gegensatz zu Sammellinsen eine negative Brechkraft, sodass sich der Bildpunkt B ebenfalls auf der Gegenstandsseite befindet. Der dritte Teilstrahl (grau) wird zur Bestimmung des Brennpunktes F_2 benötigt.

Für das Abbild eines gesamten Gegenstandes (hier: Kerze) lassen sich wieder alle Teilstrahlen durch den ersten Teilstrahl des obersten Gegenstandspunktes und den ersten Teilstrahl des untersten Punktes zusammenfassen. Ein scharfes Abbild der Kerze entsteht, aufgrund der negativen Brechkraft der Zerstreuungslinse, vor der Linse auf der Gegenstandsseite. (Vgl. Stolz 2005, S. 73)

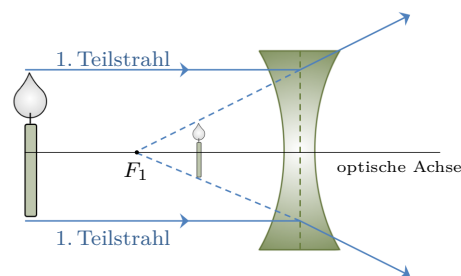


Abbildung 4.9: Abbildung eines Gegenstandes durch eine Zerstreuungslinse.⁴⁵

4.1.3 Das menschliche Auge

Das menschliche Auge kann als ein optisches Instrument angesehen werden, weil der Sehvorgang auf der Brechung von Licht an mehreren aufeinanderfolgenden Grenzflächen beruht.

⁴⁴ Abbildung aus Stolz 2005, S. 73.

⁴⁵ Abbildung in Anlehnung an Stolz 2005, S. 73.

ander folgenden gekrümmten Grenzflächen basiert. Dazu muss zunächst der Aufbau des menschlichen Auges thematisiert werden, bevor konkret auf den Sehvorgang eingegangen werden kann.

Aufbau des Auges – Bestandteile und deren Funktionen

Das Auge hat eine kugelige Form mit einem durchschnittlichen Durchmesser von etwa 24mm. Der gesamte Augapfel ist von der **Lederhaut** umgeben, die ihn schützt und ihm seine kugelige Form gibt. An die Leder-

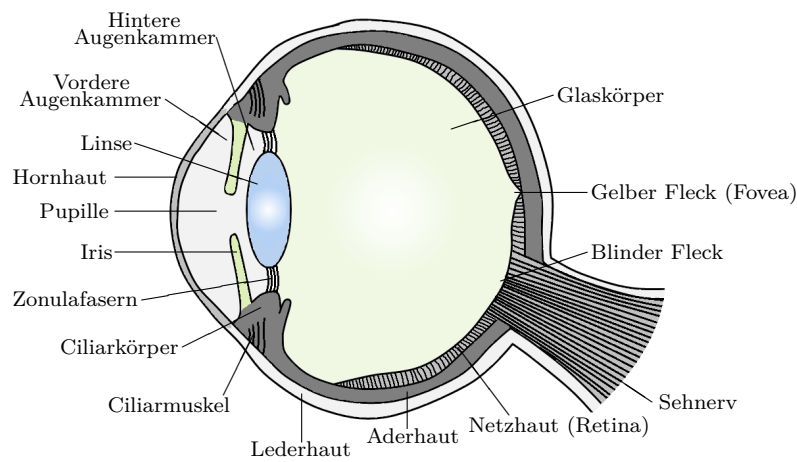


Abbildung 4.10: Querschnitt des menschlichen Auges.⁴⁶

haut grenzt die **Aderhaut**, die das Auge über zahlreiche Blutgefäße mit Nährstoffen und Sauerstoff versorgt. Im vorderen Bereich des Auges ist die Aderhaut nicht vorhanden und die Lederhaut geht in die **Hornhaut** über. Die Hornhaut hat wie die weiße Lederhaut eine Schutzfunktion, jedoch ist sie transparent, damit Licht durch sie in das Auge gelangen kann. Die Hornhaut bildet somit die erste gekrümmte Grenzfläche, an der das Licht gebrochen wird. Der vordere Bereich des Auges hinter der Hornhaut lässt sich in die mit **Kammerwasser** gefüllte **vordere** und **hintere Augenkammer** teilen. Die beiden Augenkammern werden durch die **Iris (Regenbogenhaut)** voneinander getrennt, die dem menschlichen Auge die individuelle Farbe verleiht. Das Loch in der Iris, durch welches Licht in das Innere des Auges einfallen kann, wird als **Pupille** bezeichnet. Die Iris agiert hier als Blende, sodass die Pupille, je nach Lichtverhältnissen,

⁴⁶ Eigene Zeichnung zum Aufbau des Auges, vgl. z. B. Purves et al. 2006, S.1090 (siehe auch Abbildung 3.5 auf Seite 77).

größer oder kleiner wird. Dadurch kann der Lichteinfall reguliert werden. Die an den **Zonulafasern** aufgehängte **Linse** trennt die Augenkammern von dem extrazellulär flüssigkeitsgefüllten **Glaskörper**. Die Linse ist dafür verantwortlich, dass auf der **Netzhaut (Retina)** ein scharfes Bild entsteht. Mithilfe der Zonulafasern und dem **Ciliarmuskel** kann die Brechkraft der Linse verändert werden. Dieser als *Akkommodation* bezeichnete Vorgang ist besonders für die Nah- und Fernsicht von Bedeutung. Kontrahiert der Ciliarmuskel, erschlaffen die Zonulafasern und die Linse wird aufgrund ihrer Eigenelastizität kugelig. Dadurch wird die Brechkraft der Linse vergrößert, sodass Gegenstände in der Nähe scharf gesehen werden können. Erschlafft der Ciliarmuskel, werden die Zonulafasern gestrafft und die Linse wird flacher. Dadurch wird die Brechkraft der Linse kleiner und Gegenstände in der Ferne werden scharf gesehen. Die Netzhaut besteht aus **Photorezeptoren**, die das einfallende Licht detektieren und über den **Sehnerv** an das Gehirn weiterleiten. Die menschliche Netzhaut kann zwei Arten von Photorezeptoren vorweisen: die lichtempfindlichen **Stäbchen**, die Helligkeitsunterschiede wahrnehmen, und die **Zapfen**, mit denen unterschiedliche Farben wahrgenommen werden können. Am **blinden Fleck** treten die Nervenzellen und -bündel, die mit den Photorezeptoren kommunizieren, über den **Sehnerv** aus dem Auge heraus und leiten die detektierten Informationen an das Gehirn weiter. An der Stelle des blinden Flecks befinden sich daher keine Photorezeptoren, sodass hier kein Licht wahrgenommen werden kann. Am **gelben Fleck (Fovea)**, der sich genau auf der Höhe der Linse und der Pupille befindet, sind nur Zapfen und keine Stäbchen vorhanden. Aus diesem Grund ist hier der Bereich des schärfsten Sehens. (Vgl. Eysel 2007, S. 380f.; S. 384f.; S. 391ff.; Purves et al. 2006, S. 1089ff.)

Sehvorgang – dioptrischer Apparat

Für den Sehvorgang lassen sich die an der Lichtbrechung beteiligten Bestandteile des Auges mit dem **dioptrischen Apparat** zusammenfassen. Dazu zählen die durchsichtige Hornhaut, die vordere und hintere Augenkammer, die Linse und der Glaskörper. Die Oberfläche der Hornhaut ist an der Außenseite durch einen dünnen Tränenfilm benetzt, durch welchen die optischen Eigenschaften verbessert werden. Die Gesamtbrechkraft des dioptrischen Apparats beträgt für ein normalsichtiges Auge $D_{\text{Auge}} = 58,8 \text{ dpt}$. Für die einzelnen Bestandteile (Hornhaut=H, Augen-

kammern=AK und Linse=L) lassen sich folgende Werte festhalten: $D_H = +43\text{dpt}$, $D_{AK} = -3,7\text{dpt}$, $D_L = +19,5\text{dpt}$ (fernakkommodiert). (Vgl. Eysel 2007, S. 380f.)

Für die Abbildung eines Gegenstandes lässt sich das Auge auf den dioptrischen Apparat reduzieren. Die optische Achse verläuft durch die Mitte der Hornhaut, durch die Linsenmitte und endet auf der Netzhaut im gelben Fleck. Auftreffende Lichtstrahlen, die von einem Gegenstand ausgehen bzw. von diesem reflektiert werden, werden zunächst an der durchsichtigen Hornhaut gebrochen. Da die Linse beidseitig von extrazellulärer Flüssigkeit umgeben ist, kann die Brechung des Lichts an der Linse idealisiert und auf die Linsenmitte reduziert werden. Demnach werden die bereits an der Hornhaut gebrochenen Lichtstrahlen noch einmal an der Linsenmitte gebrochen. Zwischen der Linse

und der Netzhaut sammeln sich

die gebrochenen Strahlen im Brennpunkt F_2 und bilden auf der Netzhaut ein scharfes Bild des Gegenstandes (hier: Kerze) ab. Die Linse des Auges ist eine Sammellinse, sodass ein umgekehrtes reelles Abbild der Kerze auf der Netzhaut entsteht. Mittels Signaltransduktion werden die durch die Photorezeptoren detektierten Lichtstrahlen in *retinale Rezeptorpotentiale* umgewandelt. Diese elektrischen Potentiale werden mit Hilfe der Nervenzellen in Form von *Aktionspotentialen* über den Sehnerv an das Gehirn weitergeleitet und hier verarbeitet. (Vgl. Eysel 2007, S. 380f.; S. 391ff.)

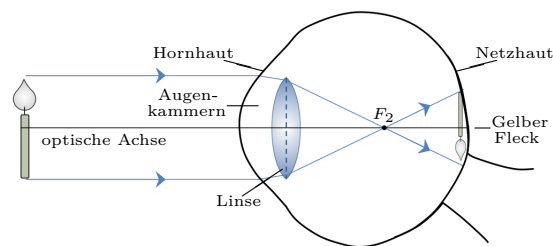


Abbildung 4.11: Optische Abbildung im Auge.⁴⁷

Refraktionsanomalien und deren Korrektur

Ein scharfes Bild des betrachteten Gegenstandes kann auf der Netzhaut nur dann entstehen, wenn sich die drei Teilstrahlen eines Gegenstandspunktes in einem Punkt (Bildpunkt) auf der Netzhaut treffen (siehe Abbildung 4.6). Die Größe des Augapfels und die Brechkraft des Auges sind dementsprechend aufeinander abgestimmt. Damit ein weit entfernter Gegenstand ($g \rightarrow \infty$) auf der Netzhaut scharf abgebildet wird, muss der Abstand zwischen der Hornhaut und dem gelben Fleck 24,4mm be-

⁴⁷ Abbildung in Anlehnung an Eysel 2007, S. 380.

tragen (gemessen auf der optischen Achse). Bei einer Abweichung des Abstandes zwischen Hornhaut und gelbem Fleck von nur 0,1mm kommt es bereits zu einer Veränderung der Gesamtbrechkraft von 0,3dpt. Diese Abweichung wird als **Refraktionsfehler** bzw. **Refraktionsanomalie** bezeichnet und stellt damit einen Brechungsfehler bzw. Sehfehler des Auges dar. Die Linse kann zwar ihre Brechkraft verändern (Akkommodation), jedoch kann sie diese Fehlsichtigkeit nicht vollständig ausgleichen. Bei der Geburt ist der Augapfel zu klein und wird durch die unscharfe Abbildung zum Wachstum angeregt, bis die passende Länge erreicht ist. Es kann jedoch vorkommen, dass der Augapfel zu lang wird. In diesem Fall würde eine fernakkomodierte Linse (geringste Brechkraft der Linse) den Gegenstand vor der Netzhaut scharf abbilden. Ein weit entfernter Gegenstand würde also unscharf gesehen werden. Dieser Sehfehler wird als **Myopie** bzw. **Kurzsichtigkeit** bezeichnet. Die Linse müsste ihre Brechkraft weiter verringern, um ein scharfes Abbild auf der Netzhaut zu erzeugen. Dies ist nur durch eine zusätzliche Linse mit negativer Brechkraft möglich. Aus diesem Grund kann eine Myopie durch eine Brille mit Zerstreuungslinsen korrigiert werden. Gegenstände in der Nähe können dagegen auch ohne zusätzliche Linse scharf gesehen werden. (Vgl. Eysel 2007, S. 382f.; Meschede 2015, S. 349f.)

Wenn der Augapfel nicht seine optimale Länge erreicht, sondern zu kurz bleibt, bildet eine fernakkomodierte Linse einen Gegenstand hinter der Netzhaut scharf ab. Auf der Netzhaut entsteht in diesem Fall ein unscharfes Bild. Die Linse besitzt im fernakkomodierten Zustand ihre geringste

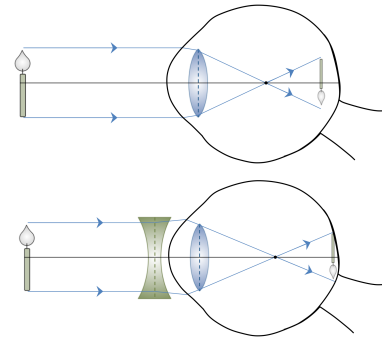


Abbildung 4.12: Strahlengang bei einer Myopie (Kurzsichtigkeit) und ihre Korrektur mit einer Zerstreuungslinse.⁴⁸

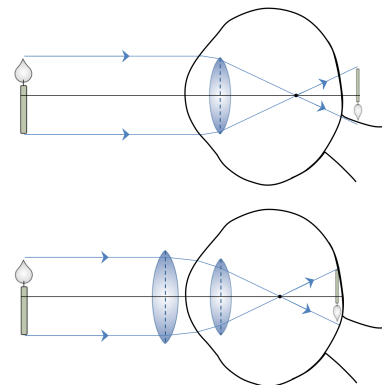


Abbildung 4.13: Strahlengang bei einer Hypermetropie (Weitsichtigkeit) und ihre Korrektur mit einer Sammellinse.⁴⁹

⁴⁸ Abbildung in Anlehnung an Eysel 2007, S. 383.

⁴⁹ Abbildung in Anlehnung an Eysel 2007, S. 383.

Brechkraft. Durch die Akkomodation kann sie ihre Brechkraft vergrößern, sodass weit entfernte Gegenstände trotzdem scharf auf der Netzhaut abgebildet werden. Allerdings werden Gegenstände in unmittelbarer Nähe nicht scharf abgebildet, weil die Brechkraft der Linse auf ein Maximum begrenzt ist. Diese Refraktionsanomalie wird **Hypermetropie** bzw. **Weitsichtigkeit** genannt und kann durch eine Brille mit Sammellinsen mit positiver Brechkraft korrigiert werden. (Vgl. Ebd.)

4.2 Didaktische und kognitionspsychologische Aufbereitung der Lernmaterialien

4.2.1 Legitimierung des Themas

Das Schulfach Physik soll einen Beitrag zur Allgemeinbildung der Schüler leisten und dementsprechend ist der Bildungsbeitrag des Faches Physik im Niedersächsischen Kerncurriculum⁵⁰ folgendermaßen festgehalten:

Im Physikunterricht erfahren die Schülerinnen und Schüler beispielhaft, in welcher Weise und in welchem Maße ihr persönliches und das gesellschaftliche Leben durch Erkenntnisse der Physik mitbestimmt werden. Der Aufbau eines physikalischen Grundverständnisses in ausgewählten Bereichen ermöglicht ihnen, Entscheidungen und Entwicklungen in der Gesellschaft im Bereich von Naturwissenschaft und Technik begründet zu beurteilen, Verantwortung beim Nutzen des naturwissenschaftlichen Fortschritts zu übernehmen, seine Folgen abzuschätzen sowie als mündige Bürger auch mit Experten zu kommunizieren. (KC NW, S. 14)

Das Thema ‚Geometrische Optik‘ wird durch das Basiskonzept *Wechselwirkung* in den bundesweit geltenden Bildungsstandards⁵¹ festgelegt: „Strahlung kann mit Materie wechselwirken, dabei können sich Strahlung und Materie verändern“ (KMK, S. 9). Es findet sich konkret in den aufgeführten Beispielen zu dem zitierten Basiskonzept wieder: „Reflexion, Brechung, Totalreflexion, Farben, Treibhauseffekt, globale Erwärmung,

⁵⁰ Niedersächsisches Kultusministerium (2015b). *Kerncurriculum für das Gymnasium Schuljahrgänge 5-10. Naturwissenschaften*. Im weiteren Verlauf wird, sobald ein Verweis auf diese Quelle erfolgt, mit KC NW abgekürzt.

⁵¹ Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2005). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss*. Im weiteren Verlauf wird, sobald ein Verweis auf diese Quelle erfolgt, mit KMK abgekürzt.

ionisierende Strahlung“ (ebd.). Dabei sind besonders die Phänomene der Lichtreflexion und -brechung für die geometrische Optik von Bedeutung. Im Niedersächsischen Kerncurriculum ist der Themenbereich *Phänomenorientierte Optik* für den Doppeljahrgang 5/6 festgelegt und umfasst eine Reihe inhaltsbezogener Kompetenzen, die an dieser Stelle ausgewählt aufgelistet werden: „Die Schülerinnen und Schüler ...

- wenden die Sender-Empfänger-Vorstellung des Sehens in einfachen Situationen an.
- nutzen die Kenntnis über Lichtbündel und die geradlinige Ausbreitung des Lichtes zur Beschreibung von Sehen und Gesehenwerden. [...]
- beschreiben Reflexion, Streuung und Brechung von Lichtbündeln an ebenen Grenzflächen.
- beschreiben die Eigenschaften der Bilder an ebenen Spiegeln, Lochblenden und Sammellinsen.
- unterscheiden Sammel- und Zerstreuungslinsen.
- wenden diese Kenntnisse im Kontext Fotoapparat oder Auge an.“ (KC NW, S. 29)

Diese Kompetenzen bieten eine Möglichkeit für eine Fächerverbindung der Unterrichtsfächer Physik und Biologie (vgl. KC NW, S. 109). Die Verknüpfung der Fächer ist besonders in Bezug auf die letztgenannte Kompetenz möglich, indem die Fachinhalte im Kontext des menschlichen Auges thematisiert werden. Dieser Kontext bietet die Möglichkeit, den Bildungsbeitrag des Faches Physik zu konkretisieren, da der Bezug zum menschlichen Auge gleichzeitig ein Bezug zum alltäglichen persönlichen Leben darstellt. Durch die im Kontext des menschlichen Auges thematisierten Fehlsichtigkeiten wird ein direkter Gegenwarts- und auch Zukunftsbezug zum alltäglichen Leben der Schüler hergestellt, da entweder die Schüler selbst oder Personen aus ihrem Umfeld eine Brille tragen. Dadurch kann ein *sinnstiftender Kontext* geschaffen werden, durch den die Möglichkeit besteht, das Interesse der Schüler zu steigern (vgl. Duit & Mikelskis-Seifert 2010, S. 1).

Die Forderung nach sinnstiftenden Kontexten resultiert besonders daraus, dass viele Schüler das Schulfach Physik als *sinnlos* einstufen, weil der

Unterricht ihnen in ihrem täglichen Leben „nicht weiter [hilft]“ (Lechte 2008, S. 247). Oftmals schafft der Physikunterricht seine eigene *synthetische Wirklichkeit*, die in keinem für die Schüler ersichtlichen Zusammenhang mit ihrem alltäglichen Leben steht. Die Unterrichtsinhalte werden innerhalb des Schulkontextes erlebt und das dadurch produzierte *träge Wissen* kann von den Lernenden nicht auf Probleme außerhalb des Schulunterrichts übertragen werden. (Vgl. Müller 2006, S. 102) Als *sinnstiftend* wird ein Kontext bezeichnet, wenn er von den Schülern als relevant eingestuft wird. Themen aus dem alltäglichen Leben der Lernenden bieten eine Möglichkeit für einen sinnstiftenden Kontext. (Vgl. Duit & Mikelskis-Seifert 2010, S. 1) Eine Kontextorientierung kann zudem das Interesse der Schüler steigern. Unterschieden werden kann dabei das *Fachinteresse* an dem Schulfach Physik generell von dem *Sachinteresse* an einem festgelegten Sachzusammenhang. Das Sachinteresse im Themenbereich der geometrischen Optik⁵² kann als eher gering⁵³ eingestuft werden: Lediglich 30 bis 35 Prozent der Schüler des fünften und sechsten Schuljahrgangs sind daran interessiert „[m]ehr über den Zusammenhang zwischen Lichtbrechung und [den] Farbe[n] des Lichtes [zu] erfahren“ (Hoffmann, Häußler & Lehrke 1998, S. 141). Ein ähnliches Bild zeichnet sich für das Interesse an der mathematischen Berechnung der Lichtbrechung und der Berechnung der Bildgröße eines auf einer Leinwand abgebildeten Gegenstandes durch eine Glaslinse ab (vgl. Hoffmann, Häußler & Lehrke 1998, S. 141f.). Aus diesem Grund erscheint das Ausrichten der Sachinhalte an einem authentischen Kontext als umso wichtiger, da es sich positiv auf das Sachinteresse der Schüler auswirken kann. Dabei ist zu beachten, dass das Interesse seitens der Schüler am Kontext selbst als hoch einzustufen sein sollte. Dementsprechend müssen gewisse Anforderungen an den Kontext gestellt werden. Werden die fachlichen Inhalte der geometrischen Optik in den Kontext des menschlichen Auges und des damit verbundenen Sehens eingebunden, wird ein Bezug zum menschlichen Körper hergestellt. Dieser Bezug ist für die Schüler interessant, da sie die Verknüpfung von physikalischen Inhalten mit der Funktion von Sinnesorganen und mit der medizinischen Diagnostik als interessant und sinnstiftend einstufen. (Vgl. Wodzinsky 2002,

⁵² Die IPN-Interessensstudie hat das Interesse zum Thema *Licht* bestimmt.

⁵³ Besonders im Vergleich zum *Sachinteresse an Naturphänomenen*, an *Radioaktivität und Kernphysik* und an *Geräten der Medizin* kann das *Sachinteresse an optischen Instrumenten* als gering eingestuft werden (vgl. Hoffmann, Häußler & Lehrke 1998, S. 46, 48).

S. 33f.; Müller 2006, S. 108f.) Die Konstruktion von Sinn und die Verbindung zur Erfahrungswelt der fachlichen Inhalte durch einen passenden Kontext bietet also die Möglichkeit, in erster Linie das Sachinteresse der Schüler zu steigern (vgl. Lechte 2008, S. 140f.).

4.2.2 Mögliche Schwierigkeiten beim Verstehen der Inhalte

Die Ausrichtung der Sachinhalte an einem für die Schüler interessanten Kontext kann zwar das Sachinteresse steigern, jedoch nicht über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten. Mit anderen Worten: Selbst wenn sich ein Schüler für den Aufbau des menschlichen Auges, den Sehvorgang oder Fehlsichtigkeiten interessiert, ist dies keine Voraussetzung dafür, dass die Inhalte verstanden werden. Für das Aufrechterhalten des Sachinteresses ist das Verstehen der Inhalte von zentraler Bedeutung. Aus diesem Grund soll ein Blick auf die Inhalte geworfen werden, die zu Schwierigkeiten beim Verstehen führen können. Dazu müssen zunächst die Alltagsvorstellungen der Schüler berücksichtigt werden, da diese als Schemata im Langzeitgedächtnis vorhanden sind und somit besonders beim Lernen neuer Inhalte eine zentrale Rolle spielen. Die Schüler verfügen über Vorstellungen, mit denen sie Phänomene aus ihrem Alltag erklären. Diese Vorstellungen agieren als Schemata im Langzeitgedächtnis und haben sich im Alltag der Schüler bewährt, jedoch sind sie nicht immer fachlich korrekt. Für die Ausbreitung des Lichts und den Vorgang des Sehens herrscht die Vorstellung, dass es einen fundamentalen Unterschied zwischen einer Lichtquelle und einem beleuchteten Gegenstand gibt. Dies steht im Widerspruch zu den grundlegenden physikalischen Überlegungen zur geometrischen Optik, da hier kein Unterschied gemacht wird. Ein beleuchteter Gegenstand agiert wie eine Lichtquelle, weil dieser das Licht reflektiert. In der Schülervorstellung können beleuchtete Gegenstände gesehen werden, weil diese von der ‚Helligkeit‘ einer Lichtquelle erfasst werden. Vereinzelt gibt es die Vorstellung von sogenannten *Sehstrahlen*, die von den Augen ausgesendet werden und auf einen Gegenstand treffen, um diesen sehen zu können. (Vgl. Duit 2002, S. 1ff.) Um die Zusammenhänge der geometrischen Optik verstehen zu können, muss deutlich werden, dass die Gegenstände das Licht der Sonne oder das Licht künstlicher Lichtquellen reflektieren und das reflektierte Licht auf die Augen trifft.

Neben den Schwierigkeiten, die aus den Alltagsvorstellungen resultieren können, kann die Konstruktion der Teilstrahlen beim Abbild eines Bildpunktes und eines gesamten Gegenstandes durch eine Sammellinse zu Verständnisschwierigkeiten führen. Dabei muss deutlich werden, dass bei der Abbildung eines Gegenstandes durch eine Sammellinse jeweils nur der erste Teilstrahl des obersten und untersten Punktes des abzubildenden Gegenstandes konstruiert wird. Zur zeichnerischen Bestimmung der Bildgröße und der Position der Brennpunkte sind die Mittelpunktstrahlen sowie die dritten Teilstrahlen unerlässlich (siehe hierzu die Abbildungen 4.6 und 4.7 auf Seite 106f.). In diesem Zusammenhang kann es vorkommen, dass es zu einer Mischung beider Darstellungen kommt. Beispielsweise wird das unscharfe Bild bei einer Fehlsichtigkeit fälschlicherweise damit erklärt, dass sich die ersten beiden Teilstrahlen des obersten und untersten Punktes eines Gegenstandes nicht auf der Netzhaut in einem Punkt treffen. Durch den Treffpunkt der beiden ersten Teilstrahlen wird jedoch der bildseitige Brennpunkt bestimmt, der keinesfalls auf der Netzhaut liegen sollte.⁵⁴

4.2.3 Beschreibung der Lernmaterialien

Die Lernmaterialien zum Thema Optik sind in fünf Kapitel gegliedert und in einen Kontext zum menschlichen Auge eingebettet.⁵⁵ Die inhaltlichen Schwerpunkte liegen dementsprechend auf dem Aufbau des menschlichen Auges, der geradlinigen Ausbreitung von Licht, der Konstruktion der Teilstrahlen beim Abbild eines Gegenstandes durch das Auge und den Fehlsichtigkeiten. Die Inhalte sollen anhand eines sinnstiftenden Kontextes thematisiert werden. Dabei handelt es sich um eine alltagsnahe Geschichte eines kurzsichtigen Jungen, dessen Sehschwäche ihm erst im Schulunterricht bewusst wird. Der Junge befindet sich in derselben Altersklasse wie die Schüler, für die die Lernmaterialien entwickelt werden. Die Geschichte zieht sich durch die gesamten Lernmaterialien.

Bevor detaillierter auf die einzelnen Kapitel eingegangen wird, sollen Überlegungen zur formalen Gestaltung angestellt werden. Die Lernmaterialien werden einheitlich mit einer Kopfzeile versehen, die den Schülern zur Orientierung dienen soll. In der Kopfzeile ist immer das Kapitel zu

⁵⁴ Diese fehlerhafte Darstellung wird gleichermaßen in Schulbüchern wie auch in grundlegenden Fachbüchern verwendet. So beispielsweise in Eysel 2007, S. 383.

⁵⁵ Die Lernmaterialien (Lernmaterialversion 1) befinden sich im Anhang auf Seite 231ff.

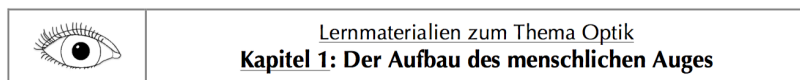


Abbildung 4.14: Kopfzeile der Lernmaterialien – Kapitel 1.

finden, das bearbeitet wird. Die Fußzeilen werden mit Seitenzahlen versehen, was ebenfalls der Orientierung dienen soll. Aufgabenstellungen werden umrandet und grau schattiert. Dadurch sollen sie sich vom restlichen Text abheben. Da zu jeder Aufgabe entweder eine Antwort geschrieben, angekreuzt oder gezeichnet werden soll, wird jede Aufgabenstellung zusätzlich mit einem Symbol versehen. Dabei handelt es sich um eine Hand, die einen Stift hält, wodurch die Schüler zum Schreiben aufgefordert werden sollen. Merksätze und Zusammenfassungen werden mit grünen Kästen umrandet. Die Farbe grün wird an dieser Stelle gewählt, weil sie als neutrale Farbe angesehen werden kann. Sie liegt im Farbspektrum des Sonnenlichts im mittleren Bereich und kann somit weder als kalt noch als warm bezeichnet werden. Dementsprechend ist auch ihre Wirkung, im Gegensatz zu Blau- oder Rottönen, eher neutral. (Vgl. Immoos 2009, S. 39) Die einheitliche Gestaltung soll zu einer Lernmaterialvertrautheit führen, die die Schüler während des Bearbeitungsprozesses erlangen. Diese Vertrautheit kann zu einer extrinsischen Entlastung des Arbeitsgedächtnisses führen, da die Aufmerksamkeit der Schüler gelenkt wird und keine kognitiven Ressourcen für das Strukturieren der Lernmaterialelemente in Anspruch genommen werden. Die Abbildungen, die im Lernmaterial verwendet werden, sind selbst konzipiert. Dadurch entsteht eine bessere Passung zwischen den Inhalten und den Abbildungen. Auf den einmaligen Einsatz dekorativer Bilder wird komplett verzichtet, da diese für das Verständnis der Inhalte keine Rolle spielen und die Schüler durch diese nur abgelenkt werden könnten (vgl. Rey 2009, S. 58). Bei der Formulierung der Texte wird besonders darauf geachtet, dass diese in einer schülergemäßen Sprache mit kurzen Sätzen verfasst werden. Bei dem erstmaligen Gebrauch von Fachbegriffen werden diese vom restlichen Text durch Fettdruck hervorgehoben, sodass hier speziell die Aufmerksamkeit fokussiert werden kann. Dies bietet die Möglichkeit, beim Zurückblättern schnellstmöglich die Fachbegriffe wiederzufinden. Wenn die Schüler innerhalb von Aufgabenstellungen dazu aufgefordert werden, einen Antwortsatz zu formulieren, wird die entsprechende Stelle im Lernmaterial mit gestrichelten Linien versehen, sodass die Schüler sauber und gerade schreiben können.

Außerdem wird darauf geachtet, dass ausreichend Platz für die Antwort zur Verfügung steht. Gleiches gilt für Antworten, die aus nur einem Wort bestehen oder für Lückentexte. Aufgaben, die die Lernenden zeichnerisch lösen sollen, werden mit einem Gitternetz hinterlegt, das dem üblichen karierten Muster entspricht (1 Kästchen = $0,5\text{cm} \cdot 0,5\text{cm}$). Durch die Aufgaben, die zeichnerisch gelöst werden sollen, wird eine prozessbezogene Kompetenz für das Fach Mathematik⁵⁶ angesprochen, die auch für das Fach Physik von zentraler Bedeutung ist. Bei der Lösung dieser Aufgaben sollen die Schüler ein „Lineal, Geodreieck [...] zur Konstruktion und Messung geometrischer Figuren [nutzen]“ (KC MA, S. 21).

Kapitel 1 – Der Aufbau des menschlichen Auges

Das erste Kapitel soll als einleitendes Kapitel für die Lernmaterialien zum Thema Optik dienen. Die Schüler sollen hier die zentralen Begriffe kennenlernen, die für die nachfolgenden Kapitel benötigt werden. Außerdem soll die Aufmerksamkeit der Lernenden auf die Thematik gelenkt werden, indem durch einen authentischen und sinnstiftenden Kontext das Interesse geweckt wird. Inhaltlich befasst sich das erste Kapitel mit dem Aufbau des menschlichen Auges und beginnt mit folgender alltagsnahen Geschichte über einen kurzsichtigen Jungen:

Tim ist 12 Jahre alt und geht in die 6. Klasse. Seitdem er einen neuen Sitzplatz in der hintersten Reihe des Klassenraumes hat, plagen ihn nach dem Unterricht starke Kopfschmerzen. Seine Lehrerin rät ihm, einen Augenarzt aufzusuchen, weil sie beobachtet hat, dass er ständig mit zusammengekniffenen Augen im Unterricht sitzt.

Rechts neben der Geschichte befindet sich eine Zeichnung des Jungen⁵⁷. Die Kombination aus Geschichte und Zeichnung agiert als Advance Organizer, weil die Lernenden durch diese Geschichte an das Thema herangeführt werden. Die Geschichte beschreibt eine realistische Alltagssituation, die das Potential besitzt, dass sich die Lernenden in die Situation hineinversetzen können. Inhaltlich werden die Schüler auf das Thema Optik eingestimmt, indem Vorwissen und Vorerfahrungen zum Sehen aktiviert

⁵⁶ Niedersächsisches Kultusministerium (2015a). *Kerncurriculum für das Gymnasium Schuljahrgänge 5-10. Mathematik*. Diese Quelle wird im weiteren Verlauf mit KC MA abgekürzt.

⁵⁷ Es stellte sich heraus, dass es mir leichter fällt Jungen zu zeichnen als Mädchen. Einzig und allein aus diesem Grund handelt die Geschichte von einem Jungen.

werden. Die Zeichnung des Jungen wird in späteren Aufgaben der Lernmaterialien verwendet, sodass auch diese als Teil des Advance Organizer legitimiert ist.

Durch die alltagsnahe Geschichte und die aufgeworfene Problemstellung, kann das Interesse der Schüler für die Fragestellung geweckt werden, welcher Zusammenhang zwischen der weiten Entfernung zur Tafel, den zusammengekniffenen Augen und den Kopfschmerzen besteht. Aus diesem Grund soll die Geschichte vertieft werden, indem die Schüler *eine Vermutung aufstellen, warum die Lehrerin Tim rät, zum Augenarzt zu gehen*. Das Formulieren einer Vermutung zur Lösung einer aufgeworfenen Problemstellung ist als eines der „wesentlichen Elemente[...] naturwissenschaftlichen Arbeitens“ (KC NW, S. 14) anzusehen und soll an „ausgewählten, authentischen Beispielen“ (ebd.) kennengelernt werden. Außerdem bietet das Aufstellen einer Vermutung zusätzlich die Möglichkeit, das Vorwissen der Lernenden zu aktivieren. Es handelt sich hier um eine offene Aufgabe, da sich die Schüler frei äußern können. Zudem wird keine mögliche Vermutung, die sich auf die Geschichte bezieht, als falsch angesehen. Daran anschließend wird die Geschichte des Jungen weitergeführt:

*Endlich zu Hause angekommen, steht Tim vor dem Spiegel und beobachtet seine Augen. Seiner Meinung nach sehen seine grünen Augen aus wie immer. Er überlegt, wie das Sehen überhaupt funktioniert: Ganz klar, zum Sehen brauchen wir unsere **Augen**. **Licht** muss auch vorhanden sein, weil wir im Dunkeln nicht sehen können.*

Damit wird inhaltlich konkreter auf den Sehprozess eingegangen. Als Voraussetzungen für das Sehen werden die Augen und das Vorhandensein von Licht genannt, welche im Folgenden wieder aufgegriffen werden. Dieser Abschnitt dient zur Überleitung von der Geschichte über das Problem im Klassenzimmer zum Aufbau des menschlichen Auges. Dabei soll an die Überleitung angeknüpft werden, indem zunächst das äußere Auge betrachtet wird, um im Anschluss den Querschnitt des menschlichen Auges und die am Sehprozess beteiligten Bestandteile zu thematisieren. Dementsprechend wird die alltagsnahe Situation aus der Überleitung folgendermaßen aufgegriffen:

*Tim kann bei dem Blick in den Spiegel seine grün gefärbte **Iris** erkennen. Außerdem sieht er seine **Pupille**, die eigentlich nur ein Loch in der Iris*

*ist. Durch die Pupille fällt Licht in das Auge ein. Auch die **Lederhaut**, die den weißen Teil des Auges bildet, kann Tim sehen. Das Auge wird auch als **Augapfel** bezeichnet.*

Dieser Abschnitt beschreibt die Bestandteile des äußeren Auges (Iris, Pupille und Lederhaut), die in der darauffolgenden Aufgabe von den Schülern einer Zeichnung des äußeren Auges zugeordnet werden sollen. Dadurch werden die Begriffe wiederholt und die Inhalte aus dem Text vertieft, sodass die Schüler den Text nicht überfliegen, sondern sich für einen kurzen Zeitraum mit den Inhalten auseinandersetzen. Die Wiederholung der Begriffe und deren Zuordnung durch die Schüler soll dazu beitragen, ein erstes Schema beziehungsweise eine erste Gedächtnisspur im Langzeitgedächtnis der Lernenden anzulegen.

Die Iris und die Pupille sollen neben der Linse, der Netzhaut und dem Sehnerv als am Sehprozess beteiligte Bestandteile des menschlichen Auges kennengelernt werden. Da die Linse, die Netzhaut und der Sehnerv von außen nicht sichtbar sind, bietet sich dieser Sachverhalt als Überleitung vom äußeren Auge zum Querschnitt des Auges an. Daran schließt sich abschnittsweise je eine Erklärung zu der Pupille und der Iris, zu der Linse, der Netzhaut und dem Sehnerv an. Die neuen Inhalte knüpfen damit an die bereits bekannten Inhalte an. Direkt neben den erklärenden Abschnitten ist eine Abbildung des Querschnitts des Auges zu sehen, die mit den am Sehprozess beteiligten Bestandteilen beschriftet ist. Den Schülern wird durch die Abbildung die Position der Bestandteile veranschaulicht. Die Bestandteile des menschlichen Auges werden auf diejenigen reduziert, die für die optische Abbildung durch eine Sammellinse von Bedeutung sind und im weiteren Verlauf des Lernmaterials vertieft werden. Durch die Position von Bild und Text sowie die Passung der Beschriftung der Abbildung und der Inhalte im daneben stehenden erklärenden Text wird der Effekt der geteilten Aufmerksamkeit vermieden.

Kapitel 2 – Ausbreitung und Reflexion von Licht

Im ersten Kapitel sind die Augen und das Vorhandensein von Licht als Voraussetzungen für das Sehen eingeführt worden. Der Fokus des ersten Kapitels liegt dabei auf dem Aufbau des menschlichen Auges, sodass es sich anbietet, im zweiten Kapitel das Licht zu thematisieren. Inhaltlich befasst sich dieses Kapitel mit der geradlinigen Ausbreitung und der Reflexion von Licht. Dazu wird wieder mit einem Advance Organizer be-

gonnen, der den Protagonisten aus der Geschichte aufgreift und in einer neuen alltagsnahen Situation beschreibt:

Tim wacht mitten in der Nacht auf und möchte sich etwas zu trinken holen. In seinem Zimmer ist es völlig dunkel und seine Nachttischlampe ist kaputt. Er hat aber vorsorglich eine Taschenlampe auf seinem Nachttisch stehen, mit der er den Weg zur Tür ganz einfach finden kann.

Durch die beschriebene Situation wird die Voraussetzung geschaffen, die geradlinige Ausbreitung von Licht zu thematisieren. Die Schüler sollen sich in die Lage versetzen können, in einem dunklen Zimmer mit Hilfe einer Taschenlampe den Weg zur Zimmertür sehen zu können. Dadurch soll verdeutlicht werden, dass Gegenstände nur dann gesehen werden können, wenn sie von einer Lichtquelle erfasst werden. Aus diesem Grund schließt an die Geschichte eine Erklärung zur geradlinigen Ausbreitung von Licht an. Dazu wird ein Exkurs gemacht, indem die geradlinige Ausbreitung von Licht anhand eines Fotos veranschaulicht wird. Auf dem Foto ist zu sehen, wie die Sonnenstrahlen durch die Bäume eines Waldes fallen.⁵⁸ Die Schüler haben dadurch einen Anknüpfungspunkt für ihr Alltagsleben, weil sie das abgebildete Phänomen mit der geradlinigen Ausbreitung der Sonnenstrahlen erklären können. Da diese Erklärung nicht direkt an die Geschichte anknüpft, sondern als ein Exkurs anzusehen ist, wird dieser Abschnitt grün umrandet und dadurch hervorgehoben. Innerhalb der Erklärung wird der Effekt der geteilten Aufmerksamkeit vermieden, indem die Abbildung direkt neben dem Text positioniert ist. Außerdem unterstützt die grüne Umrandung die Zusammengehörigkeit des Textes und des Bildes.

Die geradlinige Ausbreitung des Lichts wird aufgegriffen und auf die Taschenlampe aus der Geschichte übertragen. Dabei ist es besonders wichtig, die Alltagsvorstellungen der Schüler zum Sehen zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wird darauf eingegangen, dass die Gegenstände nur dann gesehen werden können, wenn sie vom Lichtstrahl der Taschenlampe erfasst werden. In diesem Zusammenhang wird der Begriff der Reflexion eingeführt. Als Beispiel wird die Zimmertür genannt, die nur dann gesehen werden kann, wenn diese das Licht der Taschenlampe reflektiert. Dementsprechend lernen die Schüler die „Reflexion [...] von Lichtbündeln an [einer] ebenen [Grenzfläche]“ (KC NW, S. 29) kennen.

⁵⁸ Dieses Foto ist bei einem Hunde-Waldspaziergang mit einer Smartphonekamera entstanden.

Dadurch soll den Schülern deutlich gemacht werden, dass Gegenstände nicht gesehen werden können, weil sie sich in der ‚Helligkeit‘ einer Lichtquelle befinden, sondern gezielt von dieser erfasst werden müssen und das vom Gegenstand reflektierte Licht auf die Augen des Betrachtenden fällt. Um diesen Sachverhalt einerseits zu vertiefen und andererseits die Schüler zum Nachdenken über ihre eigene Alltagsvorstellung anzuregen, wird nachfolgende Aufgabe gewählt. Innerhalb der Aufgabenstellung wird darauf hingewiesen, dass

das von der Taschenlampe ausgehende Licht an der Tür reflektiert wird und von dort aus zum Betrachter verläuft. Durch diese Aufgabe wird „die Sender-Empfänger-Vorstellung



Zeichne ein, welchen Weg das Licht von der Taschenlampe zur Tür nimmt und von dort zurück zu Tim.



des Sehens in [einer] einfachen [Situation] [angewendet]“ (KC NW, S. 29) und „die Kenntnis über Lichtbündel und die geradlinige Ausbreitung des Lichtes zur Beschreibung von Sehen [genutzt]“ (ebd.). Um die eigene Lösung zu überprüfen, steht direkt unter der Aufgabe ein grün-umrandeter Merksatz. Dieser greift auf, dass die Augen als Lichtempfänger bezeichnet werden können, da sie das von einer Lichtquelle ausgesandte und von einem Gegenstand reflektierte Licht empfangen. Dadurch wird der Inhalt einerseits wiederholt und andererseits bietet dieser Merkkasten für die Schüler die Möglichkeit, ihre eigene Lösung zu überprüfen und gegebenenfalls zu ändern, sodass hier eine Reflexion über den eigenen Lernprozess stattfinden kann.

Die ersten beiden Kapitel liefern die Voraussetzungen für das Verstehen der nachfolgenden Kapitel. Um den Verstehensprozess zu unterstützen, interagieren die beiden Kapitel nicht miteinander. Lediglich durch den Protagonisten in der Rahmengeschichte der Materialien findet sich eine Überschneidung. Die Elementinteraktivität zwischen den beiden ersten Kapitel ist dadurch als gering einzustufen. Dies ist vorteilhaft für die Bildung erster Schemata zum Thema Optik, da die Schüler die beiden Kapitel in Isolation voneinander bearbeiten und verstehen können. Wenn das zweite Kapitel inhaltlich auf dem ersten Kapitel aufbauen würde, könnte die intrinsische kognitive Belastung durch die hohe Elementinter-

aktivität dafür sorgen, dass nicht genügend freie kognitive Kapazitäten für das Verstehen der Inhalte vorhanden wären.

Kapitel 3 – Der Weg des Lichts durch das Auge

Das dritte Kapitel greift die Inhalte der ersten beiden Kapitel auf und versucht diese zusammenzuführen. Thematisiert wird hier der Weg des Lichts durch das Auge. Dies schließt die optische Abbildung eines Gegenstandes durch eine Sammellinse ein. Dazu werden die am Sehprozess beteiligten Bestandteile des menschlichen Auges schrittweise auf die Linse und die Netzhaut reduziert. Da eine Sammellinse ein reell umgekehrtes Bild eines Gegenstandes erzeugt, wird dieses Phänomen als Aufhänger für dieses Kapitel genutzt. Dazu wird die Geschichte über den kurzsichtigen Jungen folgendermaßen weitergeführt:

Tim hat einen Termin beim Augenarzt. Im Wartezimmer schnappt er sich eine Zeitschrift. Dort liest er: „Ohne die Verrechnung unseres Gehirns würde für uns die Welt auf dem Kopf stehen!“ Darin wird in schwieriger Fachsprache erklärt, dass unsere Augen die Umwelt umgekehrt wahrnehmen und unser Gehirn die wahrgenommenen Bilder dann wieder umdreht. Tim versteht aber überhaupt nichts. Vielleicht kannst du Tim helfen.

Dieser Einstieg stellt einen Advance Organizer dar. Das Phänomen des reell umgekehrten Bildes wird ohne ausführliche Erklärung genannt und soll damit den Rahmen des Kapitels bilden. Die Geschichte soll bei den Schülern das Interesse wecken, das Phänomen erklären zu wollen. Dass auf der Netzhaut ein reell umgekehrtes Bild eines betrachteten Gegenstandes entsteht, ist für die Schüler schwierig vorstellbar. Aus diesem Grund wird dieses Phänomen im Advance Organizer genannt, sodass die Schüler nicht gegen Ende des Kapitels überrascht oder verwirrt werden.

Bevor die Lichtbrechung durch eine Sammellinse in den Vordergrund rückt, werden die geradlinige Ausbreitung und die Reflexion des Lichts sowie der Aufbau des menschlichen Auges wiederholt. Innerhalb dieser Wiederholung sollen die grundlegenden Konzepte aus den ersten beiden Kapiteln zusammengeführt werden. Dazu wird in einem kurzen Textabschnitt die Sender-Empfänger-Vorstellung des Sehens wiederholt, um dann nachfolgende Aufgabe zu bearbeiten. Innerhalb der ersten Aufgabenstellung wird auf das zweite Kapitel verwiesen, indem die Schüler zum Zurückblättern aufgefordert werden.

Dadurch wird ein expliziter Bezug hergestellt. Es soll deutlich werden, dass das natürliche Licht der Sonne als Lichtquelle dient und sich dieses ebenfalls geradlinig ausbreitet.

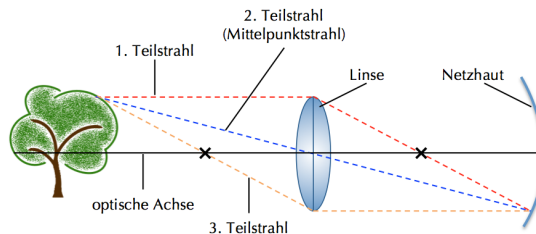


1. Zeichne den Weg des Lichts ein. *Tipp: Schau dir noch einmal den Weg des Lichts von Tims Taschenlampe an.*
2. Zeichne ein, wo sich die **Linse** und die **Netzhaut** im Querschnitt des Auges befinden und beschrifte diese.



Durch die zweite Aufgabe sollen die Linse und die Netzhaut als Bestandteile des menschlichen Auges wiederholt und zugeordnet werden. Durch die Bearbeitung dieser beiden Aufgaben wird die Voraussetzung für die Thematisierung der geometrischen Strahlenkonstruktion bei der Abbildung eines Gegenstandes auf der Netzhaut durch eine Sammellinse geschaffen.

Der Inhalt wird schrittweise zu einem Modell reduziert, indem der Aufbau des menschlichen Auges auf die Linse und die Netzhaut verkürzt und die Sonne als natürliche Lichtquelle nicht weiter berücksichtigt wird. Ein Informationstext leitet diese Verkürzung ein, indem darauf eingegangen wird, dass die Linse für das umgekehrte Bild auf der Netzhaut verantwortlich ist. Außerdem sollen die Schüler verstehen, dass sich jeder von einem Gegenstand reflektierte Lichtstrahl, bei der Abbildung durch eine Linse, in drei Teilstrahlen zerlegen lässt. Um die geometrische Konstruktion der drei Teilstrahlen kennenzulernen, werden diese in einer Zeichnung dargestellt. Dabei wird der dioptrische Apparat des Auges nur durch die Linse und die Netzhaut dargestellt. Es handelt sich durch diese Verkürzung um ein zweidimensionales Modell. Auch die Größenrelation zwischen dem Gegenstand, der Linse und der Netzhaut ist verkürzt. Diese Darstellung soll den Zweck erfüllen, den Strahlenverlauf bei der Abbildung eines Gegenstandspunktes durch eine Sammellinse kennenzulernen. Durch die Beschriftung der einzelnen Komponenten in der Zeichnung wird der Effekt der geteilten Aufmerksamkeit vermieden. Die Schüler können sich damit ausschließlich auf die Abbildung konzentrieren. Die Brennpunkte



- Was wird auf der Netzhaut an dem Punkt abgebildet, an dem sich die drei Teilstrahlen treffen?
- ein Teil des Baumstamms ein Teil der Baumkrone

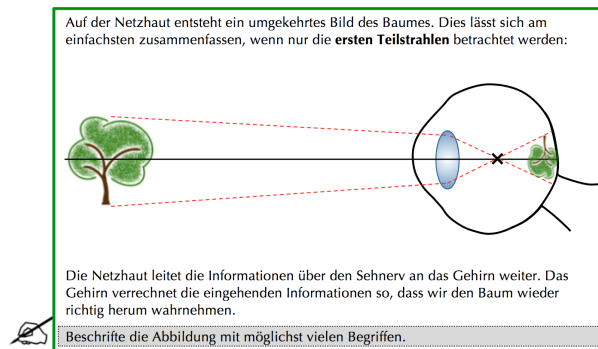
werden in der Abbildung zwar eingezeichnet, aber nicht beschriftet, damit sich die Schüler auf den Verlauf der drei Teilstrahlen konzentrieren können. Zudem könnte die Einführung vieler neue Begriffe in Kombination mit der komplexen Zeichnung zu einer intrinsischen kognitiven Überlastung bei den Lernenden führen. Damit die Abbildung nicht nur überflogen wird, steht unter ihr eine geschlossene Aufgabe, bei der sich die Schüler zwischen zwei Antworten entscheiden sollen. Dadurch wird zum einen die Aufmerksamkeit erneut auf die Abbildung gelenkt und zum anderen wird wiederholt, dass sich der Bildpunkt auf der Netzhaut auf der gespiegelten Seite zur optischen Achse befindet. Die Schüler sollen verstehen, dass im Bildpunkt *ein Teil der Baumkrone* abgebildet wird. Außerdem wird durch diese Aufgabe darauf aufmerksam gemacht, dass sich die drei Teilstrahlen in einem Punkt auf der Netzhaut treffen, was besonders für das nachfolgende Kapitel von wichtiger Bedeutung ist.

Um den Verlauf der drei Teilstrahlen weiter zu vertiefen, folgt eine Aufgabe, in der die Schüler die Teilstrahlen selbst konstruieren sollen. Die Teilstrahlen sollen vom untersten Punkt des Gegenstandes ausgehend gezeichnet werden. Dazu wird der erste Teilstrahl angedeutet, indem die gestrichelte Linie in Richtung Netzhaut verblasst. Der erste Teilstrahl ist in derselben Farbe dargestellt wie in der zuvor gezeigten Abbildung. Dadurch soll deutlich werden, dass die Teilstrahlen im Vergleich zu vorher an der optischen Achse gespiegelt werden. Die Aufgabe zielt darauf ab, dass sich die Schüler an der vorigen Zeichnung orientieren und die Teilstrahlen „in der Ebene [spiegeln]“ (KC MA, S. 29). Innerhalb dieser Aufgabe werden zwei Effekte der Cognitive Load Theorie zur Verringerung der extrinsischen kognitiven Belastung genutzt: Einerseits kann die vorige Abbildung als ein Lösungsbeispiel⁵⁹ angesehen werden, an dem sich die Schüler bei der Lösung der Aufgabe orientieren können. Und andererseits wird der Effekt der Problemvervollständigung durch den angedeuteten ersten Teilstrahl und die eingezeichneten Brennpunkte genutzt. Durch die Kombination beider Effekte sollen die Schüler den Verlauf der drei Teilstrahlen nachvollziehen und verinnerlichen. Nachdem die Teilstrahlen eingezeichnet wurden, soll die Aufmerksamkeit auf die Brennpunkte gelenkt werden. Aus diesem Grund steht unter dem Zeichenbereich eine

⁵⁹ Die Abbildung unterscheidet sich im Aufbau von einem vollständig ausgearbeiteten Lösungsbeispiel, da die Fragestellung und die Antwort fehlen. Allerdings soll es als Orientierung zur Lösung der Aufgabe dienen und damit wird der Effekt vollständig ausgearbeiteter Lösungsbeispiele in reduzierter Form genutzt.

kurze Erklärung zu den Brennpunkten mit der Aufgabe, dass diese in der Zeichnung beschriftet werden sollen. Die Positionierung der Aufgabe unter dem Zeichenbereich hat den Zweck, dass sich die Schüler erst nach dem Zeichnen der Teilstrahlen auf die Position der Brennpunkte konzentrieren, wodurch die sukzessive Konstruktion eines mentalen Schemas gefördert wird.

Nachdem die drei Teilstrahlen jeweils vom obersten und vom untersten Punkt des Gegenstandes kennengelernt wurden, soll eine Zusammenfassung des Zustandekommens des umgekehrten Bildes auf der Netzhaut erklären. Dazu werden nur die ersten Teilstrahlen dargestellt. Die Farbe der ersten beiden Teilstrahlen entspricht der zuvor gewählten Farbe. Außerdem werden die Linse und die



Netzhaut im Umriss des menschlichen Auges dargestellt, wodurch deutlich werden soll, dass die Abbildung durch die Sammellinse im Auge stattfindet. Die Schüler sollen verstehen, warum ein reell umgekehrtes Bild eines betrachteten Gegenstandes auf der Netzhaut entsteht und dadurch die „Eigenschaften der Bilder an [...] Sammellinsen [beschreiben können]“ (KC NW, S. 29). Zudem wird mit dem Zustandekommen des reell umgekehrten Bildes thematisiert, dass das menschliche Gehirn für die Verrechnung der von der Netzhaut aufgenommen und über den Sehnerv weitergeleiteten Informationen verantwortlich ist. Um die Inhalte des Kapitels zu rekonstruieren, werden die Schüler aufgefordert, *die Abbildung mit möglichst vielen Begriffen zu beschriften*. Diese Aufgabe entspricht dem Zielfreiheitseffekt der Cognitive Load Theorie und hat zum Ziel, dass die Schüler selbstständig und sukzessive die abgebildeten Komponenten rekonstruieren. Dadurch wird das zuvor aufgebaute Schema verfestigt und es besteht die Möglichkeit, eventuelle Lücken zu schließen. Diese zielfreie Aufgabe bezieht sich allerdings nur auf die zuvor kennengelernten Komponenten und wiederholt das Zustandekommen des reell umgekehrten Bildes auf der Netzhaut. Um dieses Phänomen weiter zu vertiefen, soll den Schüler durch eine Mehrfachauswahl-Aufgabe bewusst werden,

dass die Linse als *Teil des menschlichen Auges dafür verantwortlich ist, dass vorerst ein umgekehrtes Bild entsteht*. Danach verfassen die Schüler eine eigene Antwort zu der halboffenen Aufgabe, *warum der Baum trotzdem „richtig herum“ wahrgenommen wird*. Diese beiden Aufgaben sind, wie die zielfreie Aufgabe, Rekonstruktionsaufgaben. Die Antworten auf die Fragen sind in diesem Kapitel zu finden. Die Aufgaben sollen den Zweck der Wiederholung und Vertiefung erfüllen, sodass die Schüler das Phänomen des reell umgekehrten Bildes auf der Netzhaut verstehen.

Kapitel 4 – Wie entsteht ein scharfes Bild?

Im vierten Kapitel wird die Konstruktion der Teilstrahlen bei der Abbildung durch eine Sammellinse aufgegriffen und vertieft. Dabei wird der Fokus auf das Zustandekommen eines scharfen Bildpunktes auf der Netzhaut gelegt. Der gemeinsame Treffpunkt der Teilstrahlen auf der Netzhaut wird damit in diesem Kapitel vertieft. Die Schüler sollen erkennen, dass der Abstand von der Netzhaut zur Linse ausschlaggebend für das Entstehen eines scharfen Bildes ist. Vernachlässigt wird dabei, dass die Linse in der Lage ist, ihre eigene Brechkraft zu ändern (Akkommodation). Um die Aufmerksamkeit auf die Fehlsichtigkeiten zu lenken, wird die alltagsnahe Geschichte über den Jungen folgendermaßen weitergeführt:

Endlich wird Tim aus dem Wartezimmer in das Behandlungszimmer des Augenarztes gerufen. Tim erzählt von seinen Kopfschmerzen, seitdem er seinen neuen Sitzplatz im hinteren Teil des Klassenraumes hat. Der Augenarzt möchte daraufhin mit Tim einen Sehtest machen. Dazu muss sich Tim ein Auge zuhalten und von einem Plakat Zeichen ablesen. Diese Zeichen sind schwarze Ringe, die jeweils an einer Seite eine Öffnung haben. Tim muss die Seite nennen, an der sich die Öffnung befindet. Mit jeder Reihe werden die Ringe kleiner. Tim kann die unterste Reihe weder mit dem rechten noch mit dem linken Auge komplett richtig vorlesen.

Direkt neben dem Text befindet sich eine Abbildung, die ein Beispiel eines Sehtestes zeigt. Dadurch sollen sich die Schüler noch einfacher in die Situation des Protagonisten versetzen können. Um das aufgeworfene Problem des fehlerhaften Vorlesens der untersten Reihe des Sehtestes zu vertiefen, steht direkt unter dem Text eine Zweifachauswahlaufgabe. Dabei soll von dem Ergebnis des Sehtests darauf geschlossen werden, dass *Tim Gegenstände in der Ferne schlecht erkennen kann*. Die Schüler sind

mit der Lösung der Aufgabe an der Diagnostik des Augenarztes beteiligt. Um von der Erkennung des Problems zu dessen Ursache überzuleiten, wird die Geschichte folgendermaßen fortgeführt:

Der Augenarzt bittet Tim, eine Brille aufzusetzen. Damit kann Tim auch die unterste Reihe viel besser erkennen. Tim ist überrascht und der Augenarzt erklärt ihm, dass er eine Sehschwäche hat. Genauer gesagt ist der Abstand zwischen Tims Linse und Netzhaut zu groß, sodass kein scharfes Bild entstehen kann.

Die Geschichte sowie die eingespeiste Aufgabe bilden den Einstieg in das Kapitel. Dieser Einstieg agiert als Advance Organizer, da das Problem der Fehlsichtigkeit erkannt und dessen Ursache genannt wird.

Daran schließt die Wiederholung an, dass sich bei der Entstehung eines Bildpunktes durch eine Sammellinse alle drei Teilstrahlen in einem Punkt auf der Netzhaut treffen müssen. Dazu wird die bereits bekannte Abbildung verwendet, in der ein Baum, die Linse und die Netzhaut sowie die drei Teilstrahlen vom obersten Punkt des Baumes ausgehend zu sehen sind. Zudem sind die Brennpunkte eingezeichnet. Über dieser Abbildung steht die erste Aufgabe für die Schüler, *den Punkt in der Zeichnung zu markieren, an dem sich die drei Teilstrahlen auf der Netzhaut treffen*. Nachdem der Treffpunkt markiert wurde, sollen die Schüler in der zweiten Aufgabe, die unter der Zeichnung steht, die Position der Netzhaut verändern. Die Lernenden sollen erkennen, dass sich die drei Teilstrahlen nicht mehr in einem Punkt treffen, wenn sich der Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut verkleinert (Teilaufgabe a) oder vergrößert (Teilaufgabe b). Zudem sollen sie den Zusammenhang zwischen dem Abstand der Netzhaut zur Linse und einem zu langen oder zu kurzen Augapfel erkennen. Diesen Zusammenhang sollen die Schüler in der darauffolgenden Aufgabe auf den Protagonisten der Geschichte übertragen, indem sie einerseits festhalten, dass dessen *Augapfel zu lang* ist und andererseits aus der vorigen Aufgabe die veränderte Position der Netzhaut bestimmen, die für den kurzsichtigen Jungen zutrifft. Mit der Bearbeitung dieser Aufgabe sollen die Schüler die Ursache für die Fehlsichtigkeit des Jungen erkannt haben. Im Folgenden sollen sie die Entscheidung treffen, ob es sich bei der Fehlsichtigkeit um eine Kurz- oder Weitsichtigkeit handelt. Dazu folgt ein kurzer Informationstext, der den Zusammenhang zwischen dem Ergebnis eines Sehtests, der Länge des Augapfels und der Bezeichnung der Fehlsichtigkeit zusammenfasst. Dabei wird sowohl auf die Kurz- als auch auf

die Weitsichtigkeit eingegangen. In der darauffolgenden Aufgabe sollen die Schüler entscheiden, um welche Fehlsichtigkeit es sich bei dem Protagonisten aus der Geschichte handelt. Diese Entscheidung kann aufgrund der Lösungen aus den vorigen Aufgaben getroffen werden. Die bisher beschriebenen Elemente des Kapitels interagieren stark miteinander. Das bedeutet, dass die Elementinteraktivität und damit auch die intrinsische kognitive Belastung sehr hoch sind. Die Schüler müssen die Ergebnisse der einzelnen Aufgaben im Hinterkopf behalten, um die nachfolgenden Aufgaben lösen zu können. Um die extrinsische kognitive Belastung besonders gering zu halten, werden die Zwischenergebnisse schriftlich festgehalten, sodass im Laufe der Bearbeitung zurückgeblättert werden kann. Dadurch müssen sich die Schüler nicht alle Zwischenergebnisse merken. Außerdem sind die Aufgaben so gestaltet, dass Teilergebnisse der vorigen Aufgaben aufgegriffen werden, wodurch sich die Schüler selbst kontrollieren und damit ihren Lernprozess eigenständig regulieren können. Sie erhalten dadurch sukzessive Feedback, durch das sie ihre Ergebnisse überprüfen können.

Um die Schüler an die Korrektur einer Fehlsichtigkeit heranzuführen, sollen sie erkennen, dass sich die drei Teilstrahlen trotzdem in einem Punkt auf der Netzhaut treffen können, auch wenn der Abstand zwischen Linse und Netzhaut vergrößert ist. Die Lösung liegt hier im Verschieben der Brennpunkte. Dazu sollen sie zunächst – in der altbekannten Zeichnung, bestehend aus einem Baum, Linse und Netzhaut – die drei ange deuteten Teilstrahlen vervollständigen. Innerhalb dieser Zeichnung wird der Effekt der Problemvervollständigung aus der Cognitive Load Theorie angewendet. Außerdem haben die Schüler die Möglichkeit, sich, durch Zurückblättern, am Verlauf der Teilstrahlen zu orientieren. Danach sollen sie in der darunter stehenden Zeichnung, in der der Abstand zwischen Linse und Netzhaut vergrößert ist, noch einmal die drei Teilstrahlen einzeichnen. Als Hilfestellung ist dazu der oberste Punkt des Baumes markiert, von dem die Teilstrahlen ausgehen sollen. Außerdem ist dieser Punkt mit einem in einer Sprechblase befindlichen Tipp versehen, der darauf hinweist, dass mit dem Mittelpunktstrahl begonnen werden soll und dass die drei Teilstrahlen an dem Punkt auf der Netzhaut zusammentreffen, an dem der zweite Teilstrahl auf die Netzhaut trifft. Da die Sprechblase direkt in die Zeichnung integriert ist, wird hier der Effekt der geteilten Aufmerksamkeit vermieden. Durch diese Hilfestellungen handelt es sich

auch bei dieser Aufgabe um eine Vervollständigungsaufgabe gemäß der Cognitive Load Theorie. Außerdem dient die obere Zeichnung als Orientierung und kann als Lösungsbeispiel in reduzierter Form angesehen werden. Die Schüler werden zudem dazu aufgefordert, die Brennpunkte einzuzuzeichnen. In einer Mehrfachauswahlaufgabe, die sich unter den Zeichnungen befindet, sollen die Lernenden darauf aufmerksam gemacht werden, dass sich neben *der Position der Netzhaut auch die Position der Brennpunkte verändert*.

Kapitel 5 – Sehfehler korrigieren

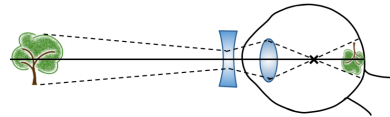
Das fünfte Kapitel ist gleichzeitig das Abschlusskapitel der Lernmaterialien. Inhaltlich wird direkt an dem Entstehen eines scharfen Bildes auf der Netzhaut trotz vergrößertem Abstand zwischen Linse und Netzhaut angeknüpft. Die Schüler sollen das vierte Kapitel mit der Erkenntnis abgeschlossen haben, dass sich die Brennpunkte verschieben müssen, damit ein scharfes Bild auf der Netzhaut entsteht, wenn sich der Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut ändert. Im fünften Kapitel sollen die Schüler verstehen, dass sich die Brennpunkte nur durch eine zusätzliche Linse vor dem Auge verschieben können. Dieser Sachverhalt wird zu Beginn des Kapitels durch einen Informationstext erklärt. Hier wird erwähnt, dass die Linse des Auges nicht in der Lage ist, die Position der Brennpunkte zu verändern. Der Prozess der Akkommodation wird also auch hier vernachlässigt, da die Linse eine Fehlsichtigkeit im Zustand einer maximalen Nah- oder Fernakkommodation nicht vollständig ausgleichen kann. Im Anschluss daran werden die Eigenschaften von Sammellinsen und Zerstreuungslinsen erklärt. Innerhalb dieser Informationstexte wird darauf eingegangen, dass eine Brille mit Zerstreuungslinsen eine Kurzsichtigkeit und eine Brille mit Sammellinsen eine Weitsichtigkeit ausgleichen kann. Neben den erklärenden Texten ist jeweils eine Abbildung integriert, in der die Form der Linse und die Strahlengänge zu sehen sind. Diese Abbildungen unterstützen die Erklärungen der Texte und durch dessen Integration wird der Aufmerksamkeitsteilungseffekt vermieden. Zu den Texten gibt es keine vertiefende Aufgabe, da es vielmehr darum geht, dass die Schüler die unterschiedlichen Linsen für unterschiedliche Sehschwächen kennenlernen. In den Hintergrund rückt dabei, wie die Strahlenverläufe zustande kommen. Aus diesem Grund schließt an die erklärenden Texte zu den Linsenarten eine Zusammenfassung der Kapitel in Form eines Lückentext-

tes an. Der Lückentext bezieht sich auf die alltagsnahe Geschichte über den kurzsichtigen Jungen und bringt die gesamten Inhalte zusammen. Die Schüler sollen sich beim Ausfüllen der Lücken für einen der Begriffe in den Klammern entscheiden. Dadurch wird in dieser Aufgabe der Effekt der Problemvervollständigung angewendet. Beim



Fülle die Lücken im Text aus. Entscheide dich für einen der Begriffe in Klammern.

Tim hat in der Schule Kopfschmerzen. Der Augenarzt sagt ihm, dass seine Kopfschmerzen daher kommen, weil er Gegenstände in der (Nähe/Ferne) schlecht erkennen kann. Sein Augapfel ist zu (kurz/lang), womit der Abstand zwischen seiner Linse und seiner Netzhaut zu (groß/klein) ist. Tim ist also (kurzsichtig/weitsichtig). Seine Sehschwäche kann durch eine Brille mit (Sammellinsen/Zerstreuungslinsen) korrigiert werden.



Tims neue Brille hilft ihm (sein Heft/die Tafel) in der (Nähe/Ferne) wieder deutlich zu sehen und seine Kopfschmerzen sind auch weg.

Ausfüllen sollen die Lernenden die Inhalte aus den vorigen Kapiteln rekonstruieren und damit das Problem des Protagonisten aus der Geschichte lösen. Dazu können die Schüler jederzeit zurückblättern, ihr eigenes Wissen überprüfen und eventuell aufgetretene Lücken schließen.

In den Lückentext sind zwei Abbildungen integriert. In der einen Abbildung sind die ersten beiden Teilstrahlen von dem obersten und untersten Punkt eines Gegenstandes zu sehen, die zunächst durch eine Zerstreuungslinse und danach durch die Linse des menschlichen Auges verlaufen, um auf der Netzhaut ein scharfes Bild des Gegenstandes zu erzeugen. Diese Darstellungsweise kennen die Schüler bereits aus dem dritten Kapitel, in dem thematisiert wurde, warum ein reell umgekehrtes Bild auf der Netzhaut entsteht. Die Ergänzung erfolgt hier durch die zusätzliche Linse vor dem Auge. Die zweite Abbildung greift den Probanden der Geschichte wieder auf. Im ersten Kapitel haben die Schüler bereits diese Zeichnung von dem Jungen gesehen, welche hier durch eine Brille ergänzt wird. Damit ist die Lösung des Problems zusätzlich visualisiert. Es handelt sich bei der Abbildung des Jungen mit Brille eher um einen anregenden Zusatz und weniger um eine inhaltliche Information.

Inhaltliche Anknüpfungspunkte

Die vorgestellten Lernmaterialien bieten sowohl für den Physik- als auch für den Biologieunterricht inhaltliche Anknüpfungspunkte. Der Prozess der Lichtbrechung wird in den Lernmaterialien zwar thematisiert, aber nicht als solcher bezeichnet. Begrifflich stoßen die Schüler auf die „Refle-

xion [...] von Lichtbündeln an ebenen Grenzflächen“ (KC NW, S. 29), jedoch werden deren „Streuung und Brechung“ (ebd.) nicht als Begriffe festgehalten. Aus diesem Grund bietet es sich an, diese Phänomene beispielsweise an einer durchsichtigen, ebenen Grenzfläche (Glas oder Wasser) zu visualisieren und in diesem Zusammenhang auch den Einfallswinkel, Ausfallswinkel und Brechungswinkel zu thematisieren. Dieser Anknüpfungspunkt richtet sich eher an das Fach Physik.

Der Prozess der Akkomodation kann aufbauend auf den Fehlsichtigkeiten thematisiert werden. In diesem Zusammenhang sollte die Linse des Auges als der Bestandteil herausgestellt werden, der als einziger in der Lage ist, seine Brechkraft zu verändern. Um die Fern- und die Nahakkomodation behandeln zu können, muss die Anatomie des menschlichen Auges weiter vertieft werden. Die Vertiefung dieser Inhalte eignet sich eher für den Biologieunterricht.

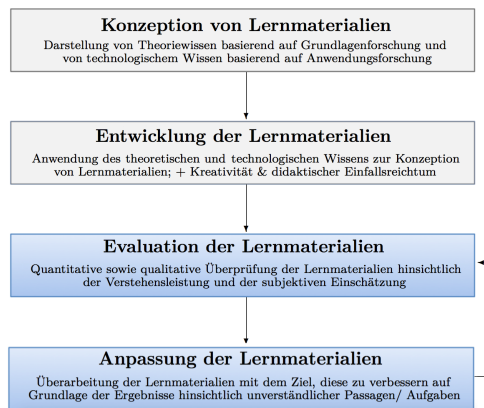
Kapitel 5

Evaluation der Lernmaterialien

Mit der Evaluation der Lernmaterialien wird zunächst der dritte Schritt des skizzierten Ablaufs angesprochen. Dafür ist ein methodisches Design entsprechend der didaktischen Entwicklungsforschung leitend. Im Vordergrund steht dabei die Weiterentwicklung und Verbesserung der

Lernmaterialien. Die Lernmaterialien sollen den Schülern die Inhalte zum Thema Optik verständlich vermitteln. Bei der Evaluation soll nicht im Vordergrund stehen, inwiefern das Verstehen der Inhalte mit den Gestaltungsmerkmalen der Cognitive Load Theorie zusammenhängt. Es geht vorrangig

um die Ermittlung von den Abschnitten der Lernmaterialien, die nicht oder nur schwer verständlich sind. Die durch die Evaluation ermittelten Schwierigkeiten innerhalb der Lernmaterialien werden zum Anlass genommen, die Materialien in dem vierten Schritt des skizzierten Ablaufs anzupassen. Im Anschluss findet eine erneute Evaluation der Lernmaterialien statt, um eine Aussage darüber treffen zu können, ob es sich bei der Anpassung um eine Verbesserung handelt. Außerdem besteht auch in der erneuten Evaluation wieder das Ziel darin, Schwierigkeiten beim Bearbeiten der Lernmaterialien aufzudecken. Daraus resultiert eine erneute Anpassung der Lernmaterialien. Dieses Vorgehen wird so lange



wiederholt, bis keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der enthaltenen Schwierigkeiten, die zu unnötigen Fehlern führen, mehr zwischen den Lernmaterialversionen vorhanden sind. Für die Evaluation der Lernmaterialien ist folgende Fragestellung leitend:

Welche Abschnitte der Lernmaterialien müssen verbessert werden?

Zunächst werden die Erhebungsinstrumente vorgestellt. Diese werden innerhalb einer Vorstudie getestet, um sie für die Hauptstudie, die den Fokus in der Verbesserung der Lernmaterialien sieht, zu verwenden.

5.1 Erhebungsinstrumente

Für das methodische Vorgehen ist die Didaktische Entwicklungsforschung leitend. Die Didaktische Entwicklungsforschung versteht sich „als ein Typus der angewandten Forschung“ (Einsiedler 2011, S. 48) und bedient sich quantitativer Methoden. Es werden qualitative Methoden hinzugezogen, um die Entwicklungsforschung zu komplettieren und nicht gegenüber der traditionellen Lehr-Lernforschung hinsichtlich des Theorie- oder Forschungsbezugs als unzulänglich zu gelten (vgl. ebd.).

Um zu überprüfen, inwiefern die Lernmaterialien verbessert werden können, muss sowohl die objektive als auch die subjektive Komponente berücksichtigt werden. Mit der objektiven Komponente ist die **Behaltens- und Verstehensleistung** der Schüler gemeint, wodurch auf die Lernwirksamkeit der Materialien geschlossen werden kann. Das Behalten der Inhalte kann als Voraussetzung für das Verstehen dieser angesehen werden. Während sich die Behaltensleistung durch die Reproduktion und Reorganisation der im Lernmaterial enthaltenen Informationen zeigt, wird die Verstehensleistung durch das Transferieren der Inhalte auf neue Kontexte gemessen. Die Verstehens- und Behaltensleistung können in der Praxis nur schwer voneinander getrennt werden, da ein Transferieren der Inhalte wiederum zu einer tieferen Verarbeitung und zu einer verbesserten Speicherung führt, wodurch ein Reproduzieren ebenfalls erleichtert wird. (Vgl. Rey 2009, S. 141) Mittels eines Wissenstests wird sowohl das Behalten als auch das Verstehen der Inhalte geprüft. Die objektive Komponente wird aber besonders durch die bearbeiteten Lernmaterialien abgedeckt. Werden in den Aufgaben Fehler gemacht, kann je nach Anforderungsni-

veau auf eine verminderte Behaltens- oder Verstehensleistung geschlossen werden.

Mit der subjektiven Komponente ist die persönliche Einschätzung der Schüler zum Verstehen, zum Schwierigkeitsgrad und zum Gefallen der Lernmaterialien gemeint. Diese Komponente wird mit einem fokussierten Interview abgedeckt. Ziel des Interviews ist es, Gründe für auftretende Schwierigkeiten beim Bearbeiten der Lernmaterialien aufzudecken, um gezielte Anpassungen in den Materialien vornehmen zu können.

5.1.1 Aufgaben in den Lernmaterialien

Die in den Lernmaterialien enthaltenen Aufgaben dienen den Schülern zum Verdeutlichen der Inhalte und sorgen dafür, dass die Sachverhalte wiederholt und tiefer verarbeitet werden.⁶⁰ Sie sind somit als Lernaufgaben zu verstehen, mit denen der Lernprozess der Schüler gelenkt wird. Zudem kann den Aufgaben aber auch entnommen werden, ob die Schüler die Inhalte verstehen. Da sich die Aufgaben zumeist auf die zuvor behandelten Inhalte beziehen, geben die gelösten Aufgaben Feedback darüber, ob diese Inhalte von den Schülern verstanden worden sind. Aus diesem Grund können Schwierigkeiten innerhalb der Lernmaterialien erkannt und Folgefehler ausfindig gemacht werden. Eine Auswertung der Aufgaben erfolgt aus diesem Grund in drei Kategorien: korrekt, falsch gelöst oder nicht gelöst, wobei die letzte Kategorie ein Auslassen der Aufgabe meint. Außerdem lässt sich aus den begangenen Fehlern in den Aufgaben oder dem Auslassen von Aufgaben auf die Verständnisschwierigkeiten der Schüler schließen. Unterstützend zu den Aufgaben in den Lernmaterialien werden ein Wissenstest und ein Interviewleitfaden erstellt.

5.1.2 Wissenstest

Mit dem Wissenstest sollen die kognitiven Aspekte seitens der Schüler überprüft werden. Es geht um die Behaltens- und Verstehensleistung. Es handelt sich bei dem Wissenstest um eine summative Leistungserfassung, die zur Erfassung des erreichten Leistungsstandes dient und „am Ende einer Unterrichtseinheit vorgenommen [wird]“ (Woolfolk 2008, S. 677). Es handelt sich bei dieser Testform um einen Leistungstest, mit dem der

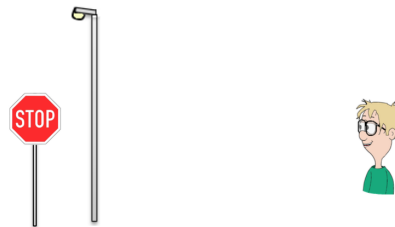
⁶⁰ Da eine konkrete Beschreibung der Aufgaben bereits stattgefunden hat, wird darauf an dieser Stelle verzichtet.

Leistungsstand der Probanden nach der Bearbeitung der Lernmaterialien getestet wird (vgl. Zierer, Speck & Moschner 2013, S. 105ff.) Im Folgenden wird der Test, äquivalent zur Vorstellung der Lernmaterialien, mit jeder Aufgabe und der zu ermittelnden Verstehens- und Behaltensleistung dargestellt.⁶¹

Die erste Aufgabe ist in drei Teilaufgaben gegliedert. Sie beziehen sich auf den Aufbau des menschlichen Auges. In der ersten Teilaufgabe sollen die Schüler die Bestandteile des menschlichen Auges mit den Begriffen *Iris*, *Pupille*, *Linse*, *Netzhaut* und *Sehnerv* beschriften. Dazu ist das Auge im Querschnitt abgebildet, wobei es sich um dieselbe Abbildung handelt, die auch in den Lernmaterialien zu finden ist. Da die Begriffe nicht vorgegeben sind, handelt es sich um die Reproduktion der Begriffe und deren korrekte Platzierung. Die zweite Teilaufgabe ist ebenfalls eine halboffene Aufgabe, in der die Schüler die Linse als den *Bestandteil des menschlichen Auges benennen sollen, der vorerst dafür sorgt, dass ein umgekehrtes Bild entsteht*. Innerhalb der dritten Teilaufgabe sollen die Schüler erklären, *warum wir unsere Umwelt nicht umgekehrt sehen*. Bei diesen ersten drei Teilaufgaben handelt es sich um Reproduktions- und Reorganisationsaufgaben der Inhalte aus dem ersten und dem dritten Kapitel der Lernmaterialien.

Die zweite Aufgabe des Wissenstests stellt eine abgewandelte Form der Aufgabe im zweiten Kapitel der Lernmaterialien dar, in der die Schüler den Weg des Lichts von Tims Taschenlampe einzeichnen sollen. In der Aufgabe, die Bestandteil des Wissenstests ist, sollen die Schüler ebenfalls den Weg des Lichts einer künstlichen Lichtquelle einzeichnen. Eingebettet ist diese Aufgabe in eine kurze Alltagssituation des Protagonisten aus den

2. Tim läuft nach dem Fußballtraining nach Hause. Es ist bereits dunkel, sodass die Straßenlaternen schon an sind. Auf dem Heimweg kommt er an einer Kreuzung vorbei und sieht schon von weitem, dass es sich um eine Kreuzung mit einem Stoppschild handelt.
Zeichne den Weg des Lichts ein.



Lernmaterialien. Sie stellt, wie die Aufgabe zuvor, eine Reproduktionsaufgabe dar, weil die Schüler den Weg des Lichts entsprechend des zweiten Kapitels der Lernmaterialien reproduzieren sollen.

⁶¹ Der Wissenstest befindet sich im Anhang auf Seite 235.

Die dritte Aufgabe besteht wieder aus drei Teilaufgaben. Inhaltlich wird das geometrische Konstruieren der drei Teilstrahlen überprüft, indem die Schüler ausgehend vom Stoppschild den ersten und dritten Teilstrahl einzeichnen sollen. Der zweite Teilstrahl ist in dieser Aufgabe bereits vorgegeben, da

die Schüler in den Lernmaterialien die Teilstrahlen nie ohne Hilfestellung konstruiert haben. Demnach können die Schüler durch die Lernmaterialien kein vollständiges Schema zum Kon-

struieren der Teilstrahlen aufgebaut haben, weil dazu das eigenständige Wiederholen des Konstruierens fehlt. Aus diesem Grund kann in dem Test nicht erwartet werden, dass die drei Teilstrahlen ohne Hilfestellung fehlerfrei konstruiert werden können. In der zweiten Teilaufgabe sollen die Schüler die Brennpunkte einzeichnen und beschriften. Die dritte Teilaufgabe ist eine Multiple-Choice-Aufgabe mit vier Antwortmöglichkeiten, von denen eine Antwort korrekt ist. Inhaltlich geht es dabei um den Punkt auf der Netzhaut, an dem die drei Teilstrah-

len zusammentreffen. Mit dieser Aufgabe wird überprüft, ob die Schüler einerseits den Zusammenhang zwischen dem Entstehen eines scharfen Bildpunkts auf der Netzhaut und dem Zusammentreffen der drei Teilstrahlen verinnerlicht haben und andererseits wissen, dass der Bildpunkt ein reell gespiegelter Punkt des Gegenstandspunktes ist. Es handelt sich dabei um eine Reorganisationsaufgabe der Inhalte des vierten Kapitels der Lernmaterialien. Die ersten beiden Teilaufgaben umfassen zudem Inhalte des dritten Kapitels.

Mit der vierten und letzten Aufgabe des Wissenstests wird die Transferleistung der Schüler überprüft. Dazu wird derselbe Lückentext wie im fünften Kapitel der Lernmaterialien genommen. Jedoch wird dieser nicht auf den kurzsichtigen Jungen bezogen, sondern auf dessen weitsichtige

3. Der Weg des Lichts durch das Auge

a) Vervollständige die Zeichnung, indem du den 1. und 3. Teilstrahl einzeichnest.

b) Zeichne die Brennpunkte ein und beschrifte sie.

c) Die drei Teilstrahlen treffen sich auf der Netzhaut in einem Punkt. Welche Aussage trifft für diesen Punkt zu?

- Hier müssen sich die Strahlen treffen, weil sich hier der Brennpunkt befindet.
- Nur wenn sich die Strahlen in einem Punkt treffen, kann hier ein scharfes Abbild des obersten Teils des Stoppschildes entstehen.
- Nur wenn sich die Strahlen in einem Punkt treffen, kann hier ein scharfes Abbild des untersten Teils der Eisenstange entstehen.
- Es ist völlig egal, ob sich die Teilstrahlen in einem Punkt treffen.

Schwester. Die Schüler müssen die Inhalte aus den Lernmaterialien auf den neuen Kontext beziehen. Dadurch kann überprüft werden, ob die Schüler die Zusammenhänge zwischen der Länge des Augapfels, dem Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut und der Korrektur der Fehlsichtigkeit verstanden haben.

4. Tims ältere Schwester Lisa macht auch einen Sehtest beim Augenarzt. Es stellt sich heraus, dass sie ebenfalls eine Sehschwäche hat. Im Gegensatz zu Tim ist Lisa **weitsichtig**.
Fülle den Lückentext aus.

Lisa kann Gegenstände in der(Nähe/Ferne)
schlecht erkennen. Ihr Augapfel ist zu(lang/kurz),
womit der Abstand zwischen ihrer Linse und ihrer Netzhaut
zu(groß/klein) ist. Ihre Weitsichtigkeit kann durch
eine Brille mit(Sammellinsen/Zerstreuungslinsen)
korrigiert werden.



5.1.3 Interview

Während der Wissenstest schriftlich den Leistungsstand der Schüler erfasst, handelt es sich bei einem Interview um eine mündliche Befragungsform. Es lassen sich Denkgewohnheiten, individuelle Einstellungen und spezifische Wahrnehmungsmuster festhalten. (Vgl. Zierer et al. 2013, S. 63f.) Dementsprechend soll das subjektive Empfinden der Schüler zu den Lernmaterialien erfasst werden. Dazu muss zunächst die Interviewform festgelegt werden.

Interviewform

Während sich die *strukturierte* Interviewform durch zahlreiche geschlossene Fragen, deren Reihenfolge und Wortlaut im Voraus festgelegt werden, auszeichnet, kann ein *narratives* Interview als die maximal offene Form angesehen werden. Das strukturierte Interview zeichnet sich durch vorgegebene Antwortkategorien aus und zählt damit zur *vollstandardisierten* Befragungsform, die das Ziel verfolgt, die objektive Wirklichkeit hinsichtlich einer festgelegten Thematik durch eine bestimmte soziale Gruppe aufzudecken. Ein strukturiertes Interview ähnelt einem Fragebogen, wobei der Fragebogen eine schriftliche Befragungsform ist. Ein strukturiertes Interview zählt zu den quantitativen Erhebungsmethoden. In einem narrativen Interview dagegen sollen sich die Befragten frei zu einem Thema äußern. Dementsprechend gibt es weder für den Interviewer noch für den Befragten Vorgaben hinsichtlich der Fragen oder Antworten. Das narrative Interview zählt zu den *nichtstandardisierten* Befragungsformen und

damit zu den qualitativen Erhebungsmethoden. Das *fokussierte* bzw. *problemzentrierte* Interview kann als eine Zwischenform angesehen werden. Diese Interviewform ist meist leitfadengestützt und zählt zur *teilstandardisierten* Befragungsform. Demnach gibt es vorformulierte Fragen, deren Reihenfolge und Antwortmöglichkeiten jedoch nicht zwingend festgelegt sind. Die Befragten können und sollen eigene und längere Antworten liefern. Dabei wird der Fokus auf ein bestimmtes Problem gelegt und es dient dazu, „die Wirkung einer spezifischen Stimuluskonstellation (Filme, Zeitungsartikel u.ä.) [zu] erfassen“ (Hron 1982, S. 128). Dies kann durch einen teilstandardisierten Interviewleitfaden erzielt werden. Auch das fokussierte bzw. problemzentrierte Interview zählt zu den qualitativen Erhebungsmethoden. (Vgl. Hron 1982, S. 119ff.; Zierer et al. 2013, S. 64f.)

Für die Evaluierung der Lernmaterialien im Sinne der Didaktischen Entwicklungsforschung bietet sich das fokussierte Interview an, in dem der Fokus auf die Einschätzung der Schüler zu den einzelnen Abschnitten der Materialien gelegt wird. Ziel soll dabei immer die Verbesserung der Lernmaterialien sein. Bei der Durchführung eines fokussierten Interviews sind vier Gesprächsstrategien zu beachten (vgl. Hron 1982, S. 129; 133ff.):

- 1. Nicht-Beeinflussung des Befragten:** Die Befragten sollen die Möglichkeit haben, frei zu der Thematik Stellung zu nehmen und damit auf die für sie bedeutsamen Inhalte eingehen zu können. Dazu ist es wichtig, dass sich der Interviewer zurücknimmt und das Gespräch nur bedingt führt und lenkt. Dieses Vorgehen wird auch als *nicht-direktive Gesprächsführung* bezeichnet. Um also den persönlichen Bezugsrahmen der Befragten erfassen zu können, sind offene und halboffene Fragen angemessen. Bei offenen Fragen werden weder der Stimulus noch die Reaktion festgelegt, sodass die Befragten selbst die Schwerpunkte ihrer Antwort festlegen können. So können eigene Gedanken und Worte der Interviewten festgehalten werden. Halboffene Fragen bzw. *Hybridfragen* können entweder den Stimulus festlegen und die Reaktion offen lassen oder umgekehrt. Ist der Stimulus festgelegt, wird die Aufmerksamkeit und damit die Antwort des Befragten auf einen Ausschnitt der Stimulussituation gelenkt. Der Befragte kann und soll sich dazu frei äußern. Ist die Reaktion festgelegt, soll der Befragte über die Sachverhalte und die Stimulussituation berichten, zu der die vorgegebene Reaktion

passt. Geschlossene Fragen sollten bei der fokussierten Interviewform vermieden werden. (Vgl. auch Zierer et al. 2013, S. 71)

- 2. Spezifität:** Die subjektive Wirkung der Stimulussituation auf die Befragten und die Gründe für diese Wirkung sollen durch das Interview aufgedeckt werden. Die Fragen sollen auf die subjektive Einschätzung abzielen. Dabei wird die *retrospektive Introspektion* als Gesprächsmethode favorisiert. Demnach wird die Aufmerksamkeit des Befragten durch den Interviewer auf eine Stimulussituation fokussiert, sodass der Befragte diese mit seiner subjektiven Einschätzung in Verbindung bringen kann. Der Interviewer verweist auf die jeweilige Situation und stellt dazu offene und halboffene Fragen.

- 3. Erfassung eines breiten Spektrums:** Es sollen möglichst alle Reaktionen auf die Stimulussituation durch das Interview erfasst werden. Dazu muss der Interviewer entscheiden, ob die Antwort des Befragten das gesamte Spektrum seiner Reaktionen umfasst. Schweift der Befragte von der Thematik ab, kann der Interviewer die Überleitung zum nächsten inhaltlichen Schwerpunkt initiieren, indem ein Stichwort des Befragten aufgegriffen wird. Das muss jedoch spontan in der Interviewsituation erfolgen. Wenn der Interviewer einen inhaltlichen Schwerpunkt noch einmal aufnehmen möchte, nachdem der Befragte einen Themenwechsel initiierte, kann dies durch einen *zurückführenden Übergang* erfolgen. Dabei greift der Interviewer Aussagen des Befragten zu dem Inhalt auf, auf den das Gespräch gelenkt werden soll. Bleibt ein inhaltlicher Schwerpunkt während der Gesprächssituation unerwähnt, besteht die Möglichkeit, das Interview durch eine *mutierende Frage* auf diesen zu lenken. Dabei wird direkt auf den Themenbereich verwiesen, allerdings sollte immer angestrebt werden, eine mutierende Frage zu vermeiden. Wenn es unumgänglich erscheint, sollte dies erst gegen Ende des Interviews geschehen. Um dem Kriterium gerecht zu werden und damit das breite Spektrum an Reaktionen zu erfassen, müssen die genannten Gesprächsstrategien spontan angewendet werden und können im Vorfeld nur bedingt geplant werden. Ein Interviewleitfaden kann dabei helfen, das breite Spektrum zu erfassen, allerdings sollte der Interviewer in der Gesprächssituation nicht zu sehr an diesem hängen.

4. Tiefgründigkeit: Die subjektive Wirkung der Stimulussituation auf die Befragten darf nicht nur oberflächlich beschrieben werden. Es gilt tiefgreifend zu erörtern, wodurch die Reaktion zustande gekommen ist und welche individuelle Bedeutung diese für die Befragten hat. Es geht dabei um die *Fokussierung auf die Gefühle* der Interviewten. Es sollten dementsprechend Fragen formuliert werden, die auf die Gefühle der Befragten abzielen.

Interviewleitfaden

Bei der Erstellung des Interviewleitfadens für das fokussierte Interview gilt es, die vier Gesprächsstrategien zu berücksichtigen. Wichtig ist, dass der Leitfaden flexibel eingesetzt wird und damit nur als Richtlinie für das Interview gilt.

Der Interviewleitfaden⁶² wird auf die einzelnen Kapitel der Lernmaterialien angepasst. Bei der ersten Frage handelt es sich um eine offene Frage, die einen Einstieg in das Interview geben soll:

1. *Wie findest du die Lernmaterialien?*

Mit dieser Frage haben die Schüler die Möglichkeit, sich frei zu den Lernmaterialien zu äußern. Sie können selbst die Stimulussituation und ihre Reaktion festlegen. Diese Frage zielt auf die persönliche Einschätzung der Schüler ab und setzt damit den Fokus auf das subjektive Empfinden beim Bearbeiten der Lernmaterialien. Da es passieren kann, dass die Befragten auf diese Frage mit nur einem Wort oder einem kurzen Satz antworten (z. B. „gut“ oder „eigentlich ganz gut“), muss gezielt nachgefragt werden (z. B. *Was genau hat dir gut gefallen und warum?* oder *Warum machst du die Einschränkung ‚eigentlich‘? Was hat dir nicht gefallen?*). Für den Fall, dass sich ein Schüler zu Beginn des Interviews eher schüchtern zeigt, kann direkt nach dem Kontext gefragt werden, in den die Inhalte eingebettet sind. Für die einzelnen Kapitel wird nach dem Gefallen der jeweiligen Geschichte über den kurzsichtigen Jungen gefragt: *Wie findest du die kurze Geschichte über Tim? (... im Wartezimmer? ... beim Augenarzt?)*.

Mit der zweiten Frage wird der Fokus auf die Verständlichkeit der Lernmaterialien gelegt. Um auf die Verständlichkeit eingehen zu können, wird zunächst eine offene Fragestellung verwendet. Für den Fall, dass die

⁶² Der Interviewleitfaden befindet sich zudem im Anhang auf Seite 236.

Schüler mit nur einem Wort oder einem kurzen Satz antworten, kann weiter nachgefragt werden:

2. *Ist das Material verständlich?*

2.1. *Was hast du besonders gut/ leicht verstanden?*

2.2. *Was ist weniger verständlich?*

- Kapitel 1 & 2 (Abbildung zum Querschnitt des Auges): *Wie findest du es, dass die textlichen Informationen direkt neben der Abbildung stehen?*
- Kapitel 1 & 2 (Grüner Kasten zur Ausbreitung von Licht): *Hat es dir beim Verstehen geholfen, dass neben dem Text die Abbildung steht?*
- Kapitel 3: *Empfindest du die Zusammenfassung in dem grünen Kasten als hilfreich?*
- Kapitel 5: *Hast du beim Bearbeiten des Lückentextes zurückgeblättert?*
- Kapitel 5: *Hat dir die Bearbeitung des Lückentextes beim Verstehen des Gesamtzusammenhangs geholfen?*

Die Schüler haben zunächst die Möglichkeit, sich frei zur Verständlichkeit der Inhalte zu äußern. Sind sie innerhalb dieser Antwort nicht auf die genannten Schwerpunkte der Kapitel eingegangen, wird gezielt nach diesen gefragt. Die beiden Fragen zum ersten und zweiten Kapitel zielen auf die Wirksamkeit der Vermeidung des Aufmerksamkeitsteilungseffektes ab. Die Frage zur Zusammenfassung im dritten Kapitel befasst sich mit der Effektivität des Zielfreiheitseffekts. Die beiden Fragen zum fünften Kapitel zielen einerseits auf die Gesamtverständlichkeit des Materials ab und andererseits auf die Wirksamkeit des Effekts der Problemvervollständigung.

Die dritte Frage des Interviewleitfadens fokussiert das Gespräch auf die Informationsdichte der Lernmaterialien. Die Schüler sollen einschätzen, ob in den einzelnen Kapiteln entweder überflüssige Informationen vorhanden sind, die sie für das Verstehen der Inhalte nicht benötigen, oder ob Informationen fehlen und aufgrund dessen das Verstehen erschwert ist:

3. *Gibt es in den Materialien zu viele oder zu wenige Informationen?*

- 3.1. *Hast du dir beim Bearbeiten Fragen gestellt, die durch das Material nicht beantwortet wurden?*
 - Fehlte dir irgendwo eine Erklärung?
- 3.2. *Gibt es irgendwo zu viele Erklärungen, die dich eigentlich nur verwirrt haben?*

Auch hier haben die Schüler wieder zunächst die Möglichkeit, sich frei zu der Stimulussituation zu äußern. Aus diesem Grund wird zuerst wieder die offene Fragestellung gewählt, um in einem zweiten Schritt das Interview durch die halboffenen Fragen stärker zu lenken. Mit der Beantwortung dieser Frage kann abgewägt werden, ob die Verständlichkeitsdimension Kürze-Prägnanz des Hamburger Verständlichkeitskonzepts innerhalb der Texte adäquat umgesetzt worden ist. Ist die Informationsdichte zu hoch, können die Inhalte nicht verstanden werden, da nicht genügend freie Kapazitäten im Arbeitsgedächtnis für die simultane Verarbeitung der Informationen vorhanden sind. Handelt es sich dabei um überflüssige Informationen, die für ein Verstehen der Inhalte verzichtbar sind, steigt die extrinsische kognitive Belastung unnötig an. Fehlen Informationen, steigt die intrinsische kognitive Belastung an, da wichtige Brücken zwischen den Informationen fehlen.

Mit der vierten Frage wird das Interview auf die Aufgabenschwierigkeit fokussiert. Diese Fragen können auch in Kombination mit der zweiten Interviewfrage gestellt werden, da diese auf die Verständlichkeit abzielt. Daher kann es sein, dass die Schüler eine Aufgabe als schwierig empfinden, weil sie diese nicht lösen können und dies auf einem Nichtverstehen der vorigen Inhalte basiert.

4. *Wie schätzt du die Schwierigkeit der Aufgaben ein?*
 - 4.1. *Welche Aufgaben fielen dir leicht?*
 - 4.2. *Welche Aufgaben fielen dir schwer? (Warum? Wie hast du trotzdem versucht, die Aufgabe zu lösen?)*
 - Kapitel 3 (Aufgabe 1): *Hat dir der Tipp zum Weg des Lichts von Tims Taschenlampe geholfen? Hast du dich daran orientiert?*
 - Kapitel 3 (Zeichnen der Teilstrahlen): *Hast du dich beim Zeichnen der drei Teilstrahlen an der Abbildung zuvor orientiert?*

- Kapitel 4 (Seite 6): *Ist es dir leicht gefallen, die drei Teilstrahlen in die unterste Abbildung einzuzeichnen?*
 - *Woran hast du dich dabei orientiert?*
 - *Empfindest du den Tipp in der Sprechblase als hilfreich?*
- Kapitel 4 (Seite 6) *Ist dir sofort aufgefallen, dass sich die Brennpunkte verschieben?*

Die Schüler schätzen zunächst die Aufgabenschwierigkeit ein. Dabei sollen sie auch darauf eingehen, welche Aufgaben als leicht und welche als schwierig wahrgenommen werden. Dabei geht es allerdings nicht um den Schwierigkeitsgrad, sondern um das subjektive Empfinden der Schüler. Bei beiden Schwerpunkten ist es wichtig, auch nach dem Grund für die Einschätzung zu fragen. Für den Fall, dass ein Schüler eine Aufgabe löst, diese aber als schwierig einstuft, soll direkt danach gefragt werden, wie der Schüler mit diesem Problem umgegangen ist und gegebenenfalls zu einer Lösung gekommen ist. Hinsichtlich der Aufgabenschwierigkeit sollen in dem Interview die genannten Schwerpunkte zu den einzelnen Kapiteln angesprochen werden. Der erste Schwerpunkt wird auf die erste Aufgabe im dritten Kapitel gelegt. Der Fokus liegt dabei auf dem Tipp, dass sich die Schüler an dem Weg des Lichts von Tims Taschenlampe aus dem vorigen Kapitel orientieren sollen. Wird dieser jedoch als überflüssig angesehen, kann das Arbeitsgedächtnis durch die Aufforderung des Zurückblätterns unnötig extrinsisch belastet werden und die Lösung der Aufgabe wird für die Schüler erschwert. Der zweite Schwerpunkt wird auf das Zeichnen der drei Teilstrahlen im dritten Kapitel gelegt. Die vorherige Abbildung soll dabei als Lösungsbeispiel dienen. Erst wenn sich die Schüler auch daran orientieren, agiert die Abbildung als Lösungsbeispiel. Der dritte und vierte Schwerpunkt wird auf das vierte Kapitel gelegt. Die Schüler sollen hier – nachdem sie (auf Seite 5) die Netzhaut verschoben haben – eigenständig die drei Teilstrahlen konstruieren (Seite 6). Da der Effekt der Problemvervollständigung angewendet wird, soll auch konkret danach gefragt werden, woran sich die Schüler beim Zeichnen orientiert haben und ob der Tipp in der Sprechblase hilfreich bei der Lösung ist. Danach wird konkret nach dem Verschieben der Brennpunkte gefragt. Die Mehrfachauswahlaufgabe unter der Zeichnung dient dazu, die Aufmerksamkeit der Schüler auf die Brennpunkte zu lenken. Mit der Frage soll überprüft werden, ob die Aufgabe tatsächlich ihren Zweck erfüllt.

Die fünfte Interviewfrage zielt auf den Vergleich der vorgestellten Lernmaterialien mit den sonstigen Materialien ab, die den Schülern aus ihrem Unterricht bekannt sind:

5. *Kannst du Unterschiede zwischen diesen Materialien und den sonstigen Materialien aus deinem Unterricht feststellen?*

→ *Gefallen dir die Materialien besser oder schlechter? Warum?*

Mit dieser Frage sollen Vorteile der Lernmaterialien herausgestellt werden, die für eine Verbesserung wichtig sind.

Die sechste und letzte Frage des Interviewleitfadens ist, wie die vorige Frage, eher allgemeiner gehalten. Es wird auf das Interesse der Schüler fokussiert und danach gefragt, ob ihr Interesse für das Thema durch die Materialien geweckt wurde. Ein Verstehen der Sachverhalte während einer Auseinandersetzung mit diesen kann zu einem größeren Interesse an der Thematik führen (vgl. Lechte 2008, S. 213f.):

6. *Möchtest du jetzt mehr über das Thema Optik erfahren? (z. B. über das Auge oder über Brillen?)*

Mit der letzten Frage kann auf das generelle Gefallen der Materialien geschlossen werden. Inhalte, die das Interesse der Befragten geweckt haben, sind für die Schüler besonders verständlich und ansprechend gestaltet. Daraus können Hinweise für die Verbesserung der Lernmaterialien gezogen werden.

5.1.4 Umgang mit Gütekriterien

Für die Durchführung der Studie rücken die Gütekriterien Objektivität und Validität in den Vordergrund. An dieser Stelle soll auf die Gütekriterien eingegangen werden, um sie innerhalb der Evaluation zu berücksichtigen und entsprechend aufzugreifen.

Objektivität: Unter der Objektivität wird verstanden, dass die Evaluation unabhängig von der Person durchgeführt und ausgewertet werden kann, die die Befragung durchführt (vgl. Zierer et al. 2013, S. 72). Während der Bearbeitung der Lernmaterialien und des Wissenstests dürfen die Probanden nicht von außen beeinflusst werden. Bei der Durchführung des Interviews gilt besonders das Kriterium *Nicht-Beeinflussung des Befragten* als zentral. Für die Auswertung wird festgelegt, welche Antworten der Probanden innerhalb der

Lernmaterialien und des Leistungstests als korrekt oder als falsch angesehen werden. Für das Interview werden in diesem Zusammenhang Transkriptionsregeln festgelegt, auf die im weiteren Verlauf näher eingegangen wird.

Reliabilität: Unter der Reliabilität wird auch die Zuverlässigkeit einer Erhebung verstanden. Sie meint damit die Wiederholbarkeit, sodass bei einer erneuten Durchführung dieselben Ergebnisse erzielt werden. Zudem bezieht sich die Reliabilität auf die Auswertung der Ergebnisse, sodass bei wiederholter Auswertung durch dieselbe Person (Intracoder-Reliabilität) oder durch eine andere Person (Intercoder-Reliabilität) dieselben Schlüsse gezogen werden. (Vgl. ebd; Rössler & Geise 2013, S. 281f.) Auf die Reliabilitätsprüfung wird in der Hauptstudie näher eingegangen.

Validität: Unter der Validität wird die Gültigkeit der Erhebungsinstrumente verstanden. Die Validität richtet sich nach der Frage, ob mit der Forschungsmethode und den entsprechenden Instrumenten das gemessen wird, was gemessen werden soll. Die Validität bezieht sich einerseits auf die Erhebungsinstrumente an sich und andererseits auf die Auswertung der durch die Instrumente gewonnenen Ergebnisse. (Vgl. Zierer et al. 2013, S. 72, S. 130; Rössler & Geise 2013, S. 283f.)

Die Erhebungsinstrumente sollen innerhalb einer Vorstudie getestet werden. Stellen sich diese als geeignet heraus, werden diese ausgewertet und es kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob dem Gütekriterium der Validität entsprochen wird. Zudem können die Ergebnisse der Vorerhebung genutzt werden, um die Lernmaterialien zu überarbeiten, mit dem Ziel, diese zu verbessern. Damit kann eine erste Überarbeitungsschleife stattfinden.

5.2 Vorstudie

Die Lernmaterialien sowie die Erhebungsinstrumente werden innerhalb einer Vorstudie mit einer kleinen Anzahl an Probanden getestet. Durch diese Vorerhebung soll zudem der gesamte Ablauf der Erhebung geprüft werden. Da sich der Umfang der Lernmaterialien über fünf Kapitel auf sieben Seiten erstreckt, könnte ein Bearbeiten der gesamten Materialien

an einem Stück für die Schüler sehr anstrengend sein. Dadurch könnten die Ergebnisse innerhalb der Lernmaterialien, des Wissenstests und des Interviews verfälscht werden. Aus diesem Grund bietet es sich an, die einzelnen Kapitel der Lernmaterialien getrennt voneinander bearbeiten zu lassen. Das Bearbeiten der Materialien kann durch Interviews unterbrochen werden. Dazu wird der Interviewleitfaden auf die einzelnen Kapitel adaptiert. Dieses Vorgehen kann durch die Vorstudie getestet werden. Durch eine Vorerhebung ergeben sich weitere Vorteile (vgl. Rey 2009, S. 145f.): Es lassen sich **mögliche Fehlerquellen feststellen**, die sich bei der Planung der Erhebung eingeschlichen haben. Diese können für die Durchführung der Hauptstudie behoben werden. Zudem lässt sich durch die Vorstudie die **Versuchsdauer ermitteln**. Dies ist besonders hinsichtlich der Stückelung der Bearbeitung der Materialien und der Interviews hilfreich. Dadurch lassen sich die Bearbeitungs- sowie die Interviewzeit besser abschätzen. Außerdem kann dadurch den Probanden bei der Rekrutierung für die Hauptstudie eine Gesamtbearbeitungszeit genannt werden. Die Vorerhebung bietet zudem für den Versuchsleiter die Möglichkeit, **Erfahrungen mit den Hilfsmitteln** zu sammeln. Sowohl bei der Durchführung des Interviews als auch bei der Bearbeitung der Lernmaterialien muss der Versuchsleiter eine entsprechende Rolle einnehmen. Es gilt, die Probanden während der Durchführung nicht zu beeinflussen. Die Fragen des Interviewleitfadens sollten für alle Probanden gleich gestellt werden und von diesen korrekt verstanden werden. Durch die Vorstudie können Schwierigkeiten aufgedeckt und beseitigt werden, sodass der Interviewleitfaden gegebenenfalls vor der Hauptstudie überarbeitet werden kann. Neben dem Testen der Erhebungsinstrumente können durch die Vorerhebung bereits erste Ergebnisse hinsichtlich der Verbesserung der Lernmaterialien erzielt werden. In der Vorstudie geht es dabei um die **Überprüfung der Lernaufgaben**. Durch das Bearbeiten der Lernmaterialien können Rückschlüsse hinsichtlich der Verständlichkeit der Lernaufgaben gezogen werden.

5.2.1 Durchführung

Die Lernmaterialien zum Thema Optik sind für Schüler des Gymnasiums konzipiert und decken inhaltsbezogene Kompetenzen des Doppeljahrgangs 5/6 (Phänomenorientierte Optik) ab. Die Schüler befinden sich hier in einem Alter von 10 bis 12 Jahren, in Abhängigkeit vom Einschul-

lungsalter. Für die Stichprobenrekrutierung gilt es, Probanden in einem Alter von mindestens 11 Jahren bis maximal 13 Jahren zu finden. Schüler, die sich zu Beginn der 5. Klasse befinden, könnten durch die Anzahl der Materialien und die textlichen Anteile überfordert werden, sodass es ratsam ist, dass die Materialien nicht direkt nach Verlassen der Grundschule zum Einsatz kommen. Die Schüler sollten allerdings nicht älter als 13 Jahre sein, da sich ansonsten das Vorwissen der Probanden zu stark voneinander unterscheidet. Außerdem sollten die Probanden Schüler eines Gymnasiums sein, da sich die Materialien bezüglich der inhaltsbezogenen Kompetenzen auf das niedersächsische Kerncurriculum des gymnasialen Zweiges beziehen und der Schwierigkeitsgrad dementsprechend angepasst ist.

Die Vorstudie findet mit zwei Probandinnen statt, die zum Erhebungszeitpunkt 12 und 13 Jahre alt sind und sich zu Beginn der 7. Klasse eines Gymnasiums befinden. Die Lernmaterialien werden nicht an einem Stück bearbeitet. Es bietet sich an, die Bearbeitung durch Interviews zu unterbrechen, die sich auf die zuvor bearbeiteten Kapitel beziehen. Der Interviewleitfaden kann dementsprechend adaptiert werden, da sich einige Fragen auf spezielle Abschnitte der Lernmaterialien beziehen. Die allgemeinen Fragen werden für jedes Kapitel wiederholt. Der Ablauf der Vorerhebung gliedert sich folgendermaßen:

Tabelle 5.1: Ablauf der Vorstudie.

Zeit	Inhalt
30 min	Die Schülerinnen bearbeiten die Kapitel 1-3
15 min	Interview zu den Kapiteln 1-3
30 min	Die Schülerinnen bearbeiten die Kapitel 4 & 5
15 min	Interview zu den Kapiteln 4 & 5
20 min	Wissenstest
10 min	abschließendes Interview

Die Vorstudie gliedert sich in insgesamt sechs Phasen: zwei Bearbeitungsphasen, in denen die Probandinnen die Lernmaterialien zum Thema Optik bearbeiten, eine Testphase, in welcher der Wissenstest ausgefüllt wird und drei Interviewphasen, die jeweils nach den Bearbeitungsphasen und der Testphase geführt werden. Die Interviews werden mit einem Aufnahmegerät aufgezeichnet, damit der Gesprächsverlauf im Nachhinein transkribiert werden kann. Insgesamt wird mit einer Versuchsdauer von zwei

Stunden gerechnet. Nachdem die Probandinnen begrüßt wurden, stellt die Versuchsleiterin den Ablauf und den Zweck der Erhebung vor. Den Probandinnen soll verdeutlicht werden, dass das Ziel der Erhebung darin besteht, die Lernmaterialien zu verbessern und nicht den Leistungsstand der Probandinnen zu erfassen. Den Schülerinnen stehen während der Bearbeitung der Lernmaterialien die Lösungen bereit. Können die Probandinnen eine Aufgabe nicht lösen, haben sie durch einen Blick in die Lösungen trotzdem die Möglichkeit, die Lernmaterialien vollständig zu bearbeiten. Durch die schriftlichen Lösungen kann gesichert werden, dass seitens der Versuchsleitung keine zusätzlichen Hilfen gegeben werden. Diese soll lediglich zur eigenständigen Lösung der Aufgaben ermutigen und diejenigen Aufgaben notieren, bei denen in den Lösungen nachgeschaut wird. Damit wird die **Durchführungsobjektivität** gewährleistet, indem die Schüler nicht von der Versuchsleitung beeinflusst werden. Dieses Vorgehen bietet zudem Aufschluss darüber, welche Aufgaben der Lernmaterialien überarbeitet werden müssen.

In den ersten 30 Minuten bearbeiten die beiden Probandinnen die Kapitel 1-3 der Lernmaterialien zum Thema Optik. Danach wird das erste Interview geführt, welches sich auf die ersten drei Kapitel bezieht und für das 15 Minuten einkalkuliert werden. Das Interview wird auf die Fragen 1-4 aus dem Interviewleitfaden reduziert. Im Anschluss daran beginnt die zweite Bearbeitungsphase, für die wieder 30 Minuten eingeplant sind und in der die Kapitel 4 und 5 bearbeitet werden. Auf diese Phase folgt die zweite Interviewphase, die sich auf die zuvor bearbeiteten Kapitel bezieht und wieder die Fragen 1-4 des Interviewleitfadens beinhaltet. Für die zweite Interviewphase werden ebenfalls 15 Minuten eingeplant. Die Versuchsleiterin sammelt danach die ausgefüllten Lernmaterialien und die Lösungen ein, damit die Probandinnen den Wissenstest ausfüllen können. Für die Testphase werden 20 Minuten eingeplant. Da der Wissenstest unmittelbar nach dem Bearbeiten der Lernmaterialien durchgeführt wird, kann durch die Ergebnisse nicht auf ein langfristiges Behalten der Inhalte geschlossen werden. Stattdessen kann aber auf eine kurzfristige Behaltens- und Verstehensleistung geschlossen werden. Im Anschluss an den Wissenstest wird ein abschließendes Interview geführt, welches sich auf die Lernmaterialien in ihrer Gesamtheit bezieht und somit die Fragen 5 und 6 des Interviewleitfadens in den Fokus des Gesprächs stellt.

Da die letzte Interviewphase weniger Fragen beinhaltet, werden für die Gesprächsdauer 10 Minuten einkalkuliert.

5.2.2 Auswertung

Das Ziel der Vorerhebung ist zunächst, die Vorgehensweise zu testen und gleichzeitig Fehlerquellen in den Erhebungsinstrumenten aufzudecken sowie die Versuchsdauer zu ermitteln. Darüber hinaus können erste Ergebnisse hinsichtlich der Verbesserung der Lernmaterialien gewonnen werden. Dabei muss jedoch vorausgesetzt werden, dass keine Fehlerquellen in den Erhebungsinstrumenten vorhanden sind und sich das Vorgehen als geeignet und valide herausstellt.

Mögliche Fehlerquellen innerhalb der Erhebungsinstrumente können erst durch die konkrete Auswertung der Interviews und des Wissenstests festgestellt werden. Die Interviews werden für die Auswertung transkribiert. Mit der Transkription wird das durch die Audioaufnahme festgehaltene Gesprochene in eine schriftliche Form gebracht. Im Fokus steht dabei der semantische Inhalt des Interviews, sodass ein *einfaches Transkript* angefertigt wird. Dabei bleiben nonverbale Handlungen unberücksichtigt. Der Text wird zur besseren Lesbarkeit von der Umgangssprache geglättet. (Vgl. Dresing & Pehl 2015, S. 17f.) Es wird dementsprechend nach folgendem Transkriptionssystem vorgegangen (vgl. Kuckartz et al. 2008, S. 27f.; Dresing & Pehl 2015, S. 21f.):

1. Es wird jedes gesprochene Wort transkribiert, wobei Dialekte ins Hochdeutsche übersetzt werden.
2. Die Aussagen sowie die Interpunktion werden geglättet, sodass der Text an das Schriftdeutsch angepasst wird. Allerdings wird die Satzkonstruktion beibehalten. Wortwiederholungen werden nur dann mit transkribiert, wenn durch sie ein bestimmter Sachverhalt betont wird. Halbsätze, die sich auf zentrale Inhalte beziehen aber deren Vollendung fehlt, werden mit einem Abbruchzeichen „/“ versehen.
3. Eindeutige Sprechpausen werden mit „(...)“ gekennzeichnet.
4. Ausdrücklich betone Begriffe werden im Transkript durch Großbuchstaben hervorgehoben.
5. Laute, die der Zustimmung dienen („mhm, aha, ...“), werden nur dann transkribiert, wenn sie eine Antwort auf eine Frage darstellen

und diese Antwort nicht weiter ausgeführt wird. Dann werden sie zusätzlich mit „(behjahend)“ oder „(verneinend)“, „(zustimmend)“ oder „(verstehend)“ versehen. Gleiches gilt für Ein-Wort-Antworten („ja, nein, ok, . . .“).

6. Werden die Aussagen durch weitere Lautäußerungen (z. B. lachen) unterstützt, werden diese Laute im Transkript in Klammern gesetzt.
7. Jeder Sprecherwechsel wird gekennzeichnet, indem die einzelnen Sprecherbeiträge durch eine Leerzeile voneinander getrennt werden. Dadurch erhalten die einzelnen Beiträge eigene Absätze und jeder Absatz wird mit einer Zeitmarke versehen.
8. Der Sprechbeiträge des Interviewers werden mit „I:“ und die des Befragten mit „B:“ kenntlich gemacht. Handelt es sich um mehrere Befragte, werden diese zusätzlich mit Ziffern versehen (z. B. „B1:“, „B2:“).
9. Sind einzelne Worte in der Audioaufnahme unverständlich, werden sie mit „(unv.)“ versehen. Kann man den Wortlaut allerdings erahnen, werden das Wort oder der Satz in Klammern geschrieben und mit einem Fragezeichen gekennzeichnet.

Die Transkripte werden anschließend analysiert. Dabei handelt es sich um eine **quantitative Inhaltsanalyse**. Dazu werden die Transkripte nach Merkmalen analysiert, die der leitenden Fragestellung entsprechen. Zudem werden die Häufigkeiten erfasst, mit denen die Merkmale vorliegen. (Vgl. Früh 2015, S. 69) Da sich die Forschungsfrage entsprechend der didaktischen Entwicklungsforschung danach richtet, *welche Abschnitte der Lernmaterialien verbessert werden müssen*, werden die Transkripte nach Aspekten gegliedert, die Aufschluss über dieses Merkmal geben. Dazu werden zunächst zwei Kategorien erstellt, in die einerseits Passagen der Lernmaterialien fallen, die *bestehen bleiben können* und andererseits Passagen, die *verbessert werden sollten*. In die Kategorie der Passagen, die verbessert werden sollten, fallen Inhalte, die von den Schülern als schwierig oder unverständlich eingeschätzt werden. Diese Einteilung erfolgt unabhängig von den begangenen Fehlern beim Bearbeiten der Lernmaterialien oder des Wissenstests, da die Schüler auch bei einer korrekten Bearbeitung der Aufgaben diese als schwierig oder unverständlich einschätzen können. Die Passagen, die in die Kategorie *verbesserungswürdig* fallen,

werden entsprechend der Abschnitte aus den Lernmaterialien geordnet. Dazu werden die Lernmaterialien codiert, indem diese mit Kürzeln versehen und nach Textabschnitten und Aufgaben gegliedert werden. Die Kürzel werden nach folgendem Schema erstellt: An erster Stelle steht die Nummer des Kapitels. Danach folgt, um welche Form es sich innerhalb des codierten Abschnitts handelt. So werden die Aufgaben mit einem „A“, die Geschichte über den Protagonisten mit einem „T“ und Informationen mit einem „I“ versehen. Abschließend steht die Nummerierung des jeweiligen Abschnitts. Handelt es sich beispielsweise um den ersten Teil der dritten Aufgabe im dritten Kapitel, wird diese mit dem Kürzel „3A3a“ gekennzeichnet. Als Codesystem ergeben sich folgende Kürzel:

Tabelle 5.2: Vorstudie – Codesystem für die Auswertung.

Kürzel	Kurzbeschreibung	Kürzel	Kurzbeschreibung
1T1	Tim im Unterricht	3I4a	Erste Teilstrahlen für gesamte Abbildung
1A1	Vermutung aufstellen	3I4b	Abbildung zur Bildentstehung
1T2	Tim vor dem Spiegel	3I4c	Weiterleitung ans Gehirn
1I1	Iris, Pupille, Lederhaut, Augapfel	3A4	möglichst viele Begriffe
1A2	Äußeres Auge beschriften	3A5a	Linse ist verantwortlich
1I2	Querschnitt des Auges (gesamt)	3A5b	Warum richtig herum?
1I2a	Text: Aufbau inneres Auge		
1I2b	Abbildung: Querschnitt des Auges	4T1	Tim beim Augenarzt
2T1	Tim mit der Taschenlampe	4A1	Ergebnis Sehtest: Ferne
2I1	Geradlinige Lichtausbreitung (gesamter Kasten)	4I1	Abstand Linse – Netzhaut ist zu groß
2I1a	Text: Geradlinige Ausbreitung	4I2	Treffpunkt auf der Netzhaut
2I1b	Abbildung: Lichtstrahlen im Wald	4A2a	Treffpunkt markieren
2I2	Reflexion von Licht	4A2b	Beide Netzhäute zeichnen
2A1	Weg des Lichts zeichnen (Lampe)	4A2c	Lücken ausfüllen
2I3	Augen als Lichtempfänger	4A3	Augapfel ist zu lang / b
3T1	Tim im Wartezimmer	4I3	weitsichtig & kurzsichtig
3I1	Weg des Lichts der Sonne	4A4	kurzsichtig
3A1a	Weg des Lichts zeichnen (Sonne)	4A5a	3 Teilstrahlen zeichnen (2mal)
3A1b	Linse und Netzhaut beschriften	4A5b	Brennpunkte einzeichnen
3I2a	Lichtstrahl = 3 Teilstrahlen	4A5Tipp	Beginne mit dem 2. Teilstrahl
3I2b	Abbildung: Konstruktion der 3 Teilstrahlen	4A6	Brennpunkte verschieben sich
3A2	ein Teil der Baumkrone	5I1	Brennpunkte müssen sich verschieben
3I3	Überleitung: unterster Ausgangspunkt	5I2	Linsenformen (gesamt)
3A3a	Zeichnen der 3 Teilstrahlen	5I2a	Sammellinse
3A3b	Brennpunkte beschriften	5I2b	Zerstreuungslinse
3I4	Zusammenfassung (gesamter Kasten)	5A1	Lückentext
		5A1Bild	Abbildung im Lückentext

Nach dieser Einteilung wird innerhalb der Aussagen der Probanden nach Begründungen für die erhöhte Schwierigkeit gesucht. Um die Ergebnisse überblicken zu können, bietet sich das Programm MAXQDA an.

Parallel dazu werden Fehler, die beim Bearbeiten der Lernmaterialien aufgetreten sind, ausfindig gemacht und mit Fehlern innerhalb des Wissenstests abgeglichen. Im Anschluss daran werden die Interviewstellen, die auf die verbesserungswürdigen Passagen der Lernmaterialien hinweisen,

mit den gemachten Fehlern innerhalb der bearbeiteten Lernmaterialien und des Wissenstests verglichen. Allerdings findet hier keine Einzelanalyse statt. Es wird die Gesamtheit der Stichprobe sowohl in den Interviews als auch in den Lernmaterialien betrachtet. Im Optimalfall stimmen die gemachten Fehler mit den als schwierig oder unverständlich empfundenen Passagen überein. Wie bereits erwähnt, können Aufgaben korrekt gelöst werden, aber dennoch im Interview als verbesserungswürdig herausgefiltert werden. In diesem Fall muss weiterhin analysiert werden, ob die erhöhte Schwierigkeit der hohen intrinsischen kognitiven Belastung entspricht. Für den Fall, dass die Schüler beim Bearbeiten einen Fehler innerhalb der Lernmaterialien oder des Wissenstests begangen haben, diese Passage jedoch nicht als schwierig oder unverständlich empfinden, kann dies ein Hinweis auf eine Verständnisillusion sein. Dementsprechend gelten auch diese Passagen als verbesserungswürdig.

5.2.3 Ergebnisse

Der Ablauf der Vorerhebung stellt sich als geeignet heraus. Die Schülerinnen scheinen durch die Anzahl der zu bearbeiteten Materialien nicht überfordert zu sein und können in den einzelnen Interviews gezielt auf die jeweiligen Abschnitte der Kapitel eingehen. Dementsprechend sollte das Bearbeiten der Lernmaterialien auch in den weiterführenden Erhebungen getrennt voneinander stattfinden, indem es durch die Interviews unterbrochen wird. Durch die Vorstudie lässt sich eine Versuchsdauer von 95 Minuten ermitteln. Die Probandinnen benötigten für das Bearbeiten der Lernmaterialien (zusammengefasst 45 Minuten) und des Wissenstest (15 Minuten) weniger Zeit als geplant. Zudem weicht die Interviewgesamtdauer (35 Minuten) geringfügig von der Planung ab.

Sowohl die Transkripte als auch die Lernmaterialien und der Wissenstest lassen auf Passagen innerhalb der Materialien schließen, die als verbesserungswürdig gelten. Damit kann auf die Validität dieses Vorgehens geschlossen werden. Sowohl der Wissenstest als auch der Interviewleitfaden müssen nicht verändert werden. Die Vorstudie wird exemplarisch genutzt, um erste Ergebnisse zu erzielen. Allerdings wird in Anbetracht der geringen Probandenzahl auf eine Darstellung der Häufigkeitsverteilung an dieser Stelle verzichtet.

Für beide Schülerinnen erweist sich das dritte Kapitel als schwierig und unverständlich, was sich durch die gemachten Fehler bestätigt. Die

erste Schwierigkeit zeigt sich beim eigenständigen Konstruieren der drei Teilstrahlen vom untersten Punkt des Baumes ausgehend (3A3a). Beide Schülerinnen begehen beim Einzeichnen einen ähnlichen Fehler. Sie zeich-

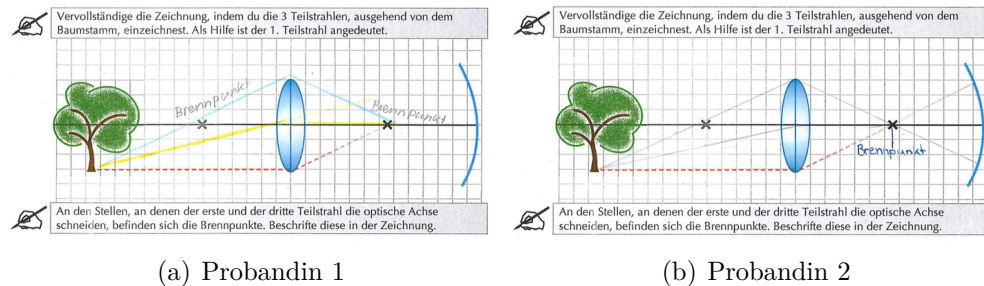


Abbildung 5.1: Vorstudie – Fehler beim Einzeichnen der drei Teilstrahlen in Kapitel 3.

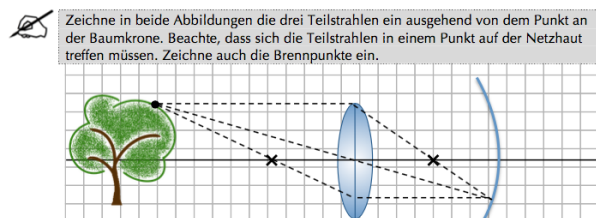
nen die drei Teilstrahlen im Bereich vor der Linse korrekt ein. Für den Bereich hinter der Linse orientieren sie sich offensichtlich an der Abbildung auf der vorigen Seite (3I2b), welche dadurch als Lösungsbeispiel agiert. Der dritte Teilstrahl, der auf den obersten Punkt der Linse trifft, wird fälschlicherweise bis zum bildseitigen Brennpunkt (Probandin 1) bzw. durch diesen Brennpunkt bis zur Netzhaut (Probandin 2) gezeichnet. Korrekterweise hätte dieser Teilstrahl hinter der Linse parallel zur optischen Achse bis zur Netzhaut gezeichnet werden müssen. Beim Verlauf des dritten Teilstrahls hinter der Linse orientieren sich die Schülerinnen an der Abbildung zuvor. Sie gehen davon aus, dass der Teilstrahl, der am obersten Punkt der Linse gebrochen wird, entweder durch den bildseitigen Brennpunkt verläuft oder an diesem ankommt. Der Mittelpunktstrahl wird ebenfalls von beiden Schülerinnen nicht korrekt eingezeichnet. Beide Schülerinnen zeichnen diesen ab dem Linsenmittelpunkt auf der optischen Achse entlang bis zum bildseitigen Brennpunkt (Probandin 1) bzw. bis zur Netzhaut (Probandin 2). Sie begründen ihren Fehler mit der neuen Perspektive des Ausgangspunktes der Teilstrahlen. Es fällt ihnen schwer, die Teilstrahlen vom Baumstamm ausgehend zu zeichnen. (Vgl. Interview zu Kap. 1-3 #00:01:33-1# - #00:02:48-4#) In der Abbildung zuvor haben die Teilstrahlen ihren Ausgangspunkt in der Baumkrone. Die Schülerinnen können das Lösungsbeispiel nicht ausreichend analysieren, um die Inhalte auf die folgende Aufgabe zu übertragen. Allerdings zeichnen die Schülerinnen die Teilstrahlen im vierten Kapitel (4A5a) und im Wissenstest korrekt ein, was wieder dafür spricht, dass die Schwierigkeit in dem veränderten Ausgangspunkt der Teilstrahlen liegt. Sie begründen das kor-

rekte Einzeichnen der Teilstrahlen im vierten Kapitel mit dem Ausgangspunkt der Teilstrahlen und dem Vorhandensein des Tipps, der darauf hinweist, dass mit dem Mittelpunktstrahl begonnen werden soll und sich die drei Teilstrahlen an einem Punkt auf der Netzhaut treffen müssen (vgl. Interview zu Kap. 4 & 5 #00:04:47-6# - #00:06:24-6#). Probandin 2 beschriftet zudem nur den bildseitigen, aber nicht den gegenstandsseitigen Brennpunkt. Im weiteren Verlauf der Lernmaterialien sowie im Wissenstest beschriftet sie allerdings beide Brennpunkte. Aus dem Interview geht hervor, dass sie die Aufgabe generell als sehr schwierig einschätzt und sie den ersten Brennpunkt schlichtweg übersehen hat (vgl. Interview zu Kap. 1-3 #00:04:01-1# - #00:04:26-1#).

Des Weiteren begehen beide Schülerinnen im dritten Kapitel (3A5a) den Fehler, die Netzhaut dafür verantwortlich zu machen, dass vorerst ein umgedrehtes Bild entsteht. Diesen Fehler wiederholen sie auch im Wissenstest, allerdings stellt sich durch das Interview heraus, dass ihnen dieser Fehler nicht bewusst ist. Es handelt sich hier um eine objektive Schwierigkeit innerhalb der Lernmaterialien und kann als eine Verständnisillusion verstanden werden.

Wie bereits erwähnt, zeichnen beide Schülerinnen die drei Teilstrahlen im weiteren Verlauf der Lernmaterialien und im Wissenstest korrekt ein. Im Interview stellt es sich allerdings für die Schülerinnen als verwirrend heraus, dass der dritte

Teilstrahl innerhalb der nebenstehenden Aufgabe (4A2a) nicht am untersten Rand der Linse gebrochen wird, sondern in deren untersten Drittel. In den an-



anderen Abbildungen innerhalb der Lernmaterialien treffen der erste und der dritte Teilstrahl immer auf den obersten und den untersten Punkt der Linse und werden hier gebrochen. Die Schülerinnen erkennen nicht, dass die Teilstrahlen durch die Linse verlaufen, sondern gehen davon aus, dass sie „um die Linse herum“ (Interview zu Kap. 4 & 5 #00:03:29-1#) verlaufen. Es handelt sich hier um eine weitere Schwierigkeit, die sich subjektiv für die Schülerinnen beim Bearbeiten der Lernmaterialien ergibt.

Im Interview stellt sich außerdem heraus, dass beide Schülerinnen das Symbol neben jeder Aufgabenstellung, welches eine Hand darstellt, die einen Stift hält, als überflüssig empfinden (vgl. abschließendes Interview #00:01:11-1# - #00:02:01-6#).

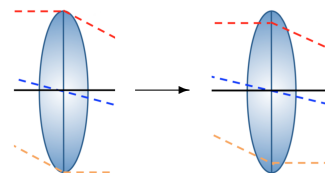
Insgesamt wird durch die Beschreibung der Ergebnisse deutlich, dass durch das getestete Forschungsdesign Schwierigkeiten in den Lernmaterialien herausgestellt werden können. Dies lässt auf die Validität der Erhebungsinstrumente schließen, da das gemessen wird, was gemessen werden soll. Aus diesem Grund kann eine erste Überarbeitungsschleife der Lernmaterialien stattfinden, bevor diese innerhalb der Hauptstudie erneut getestet werden.

5.2.4 Erste Anpassung der Lernmaterialien

Die Lernmaterialien werden auf Grundlage der Ergebnisse aus der Vorstudie angepasst.⁶³ Dabei handelt es sich vorrangig um die Abschnitte, in denen die Schülerinnen Fehler begehen und die für sie als schwer verständlich gelten. Es werden zum einen formale und allgemeine Anpassungen der gesamten Materialien vorgenommen. Zum anderen liegt der Fokus der Überarbeitung auf dem dritten Kapitel der Lernmaterialien. Dabei handelt es sich insbesondere um eine inhaltliche Überarbeitung. Diese erste Anpassung der Lernmaterialien basiert auf den Ergebnissen der Vorstudie, was zur Folge hat, dass es sich nur um geringfügige Anpassungen handeln kann. Erst in der Hauptstudie, in der die Probandenzahl erhöht wird, können die Anpassungen umfangreicher sein.

Allgemeine Anpassung

Da sich das Symbol der Hand, die einen Stift hält, neben jeder Aufgabenstellung als überflüssig herausstellt, wird es aus den Lernmaterialien entfernt. Außerdem werden alle Abbildungen, in denen die drei Teilstrahlen vom Baum ausgehend durch die Linse verlaufen und auf die Netzhaut treffen, so angepasst, dass sowohl der erste als auch der dritte Teilstrahl nicht auf den obersten und den untersten Punkt der Linse treffen, sondern geringfügig in Richtung Linsenmittelpunkt verschoben



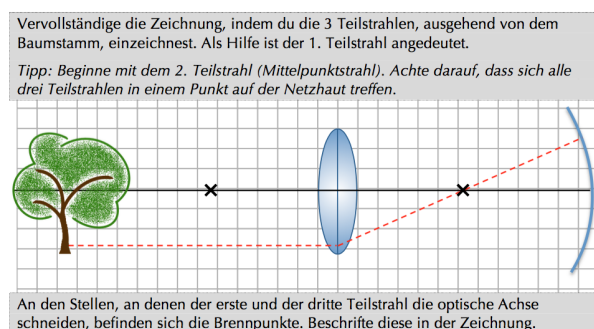
⁶³ Die angepasste Version der Lernmaterialien (Lernmaterialversion 2) befindet sich im Anhang auf Seite 237ff.

werden. So wird deutlich, dass die Teilstrahlen durch die Linse verlaufen und nicht um die Linse herum, wie von den Schülerinnen aus der Vorstudie angenommen.

Anpassung von Kapitel 3

Im dritten Kapitel wird zunächst die vierte Aufgabe (3A4) angepasst, die von den Schülerinnen als schwierig und unverständlich eingestuft wird. Dabei handelt es sich um die Aufgabe, in der zum ersten Mal eigenständig die drei Teilstrahlen eingezeichnet werden sollen. Die Aufgabe wird mit einem Tipp versehen, der

darauf hinweist, dass beim Einzeichnen mit dem Mittelpunktstrahl begonnen werden soll. Zudem endet der ange deutete erste Teilstrahl nicht mehr beim bildseitigen Brennpunkt, sondern wird bis zur Netz-



haut durchgezogen. Dadurch soll verhindert werden, dass die Teilstrahlen fälschlicherweise nur bis zu diesem Brennpunkt gezeichnet werden. Der Tipp entstammt in verkürzter Form dem vierten Kapitel, jedoch soll im vierten Kapitel nicht auf diesen verzichtet werden. Stattdessen wird auf die Wiederholung aufmerksam gemacht, indem das Wort „wieder“ eingefügt wird. Somit heißt es im vierten Kapitel (4A5Tipp): *Beginne wieder mit dem 2. Teilstrahl (Mittelpunktstrahl). An dem Punkt, an dem der Mittelpunktstrahl auf die Netzhaut trifft, müssen die 3 Teilstrahlen zusammentreffen.*

In das dritte Kapitel wird zudem eine neue Aufgabe aufgenommen. Da die Schülerinnen die Netzhaut dafür verantwortlich machen, dass vorerst ein umgekehrtes Bild entsteht, sollte darauf aufmerksam gemacht werden, dass die Netzhaut der Bestandteil ist, auf dem das umgekehrte Bild entsteht. Aus diesem Grund wird folgende Frage formuliert (3A5a): *Auf welchem Bestandteil des menschlichen Auges entsteht das umgekehrte Bild?* Es handelt sich dabei um eine Multiple-Choice-Aufgabe, die dieselben Antwortmöglichkeiten beinhaltet wie die darauffolgende Aufgabe, in der die Schüler die Linse als verantwortlichen Bestandteil für das umgekehrte Bild identifizieren sollen. Durch ein korrektes Ankreuzen der ersten

Aufgabe können die Schüler in der nachfolgenden Aufgabe dieselbe Antwortmöglichkeit ausschließen und sich damit selbst überprüfen.

5.3 Hauptstudie – Teil I

Die Hauptstudie wird mit den in der Vorstudie getesteten Erhebungsinstrumenten durchgeführt. Der Wissenstest und der Interviewleitfaden bleiben bestehen. Die Lernmaterialien wurden, wie beschrieben, auf Grundlage der Ergebnisse aus der Vorstudie angepasst. Der Fokus liegt dabei wie zuvor darauf, die Passagen der Lernmaterialien aufzudecken, die für die Schüler unverständlich sind sowie den Grund für deren Unverständlichkeit herauszufiltern, um sie in dem darauf folgenden Schritt zu verbessern. Es wird also weiterhin der leitenden Forschungsfrage nachgegangen, *welche Abschnitte der Lernmaterialien verbessert werden müssen*. Die Hauptstudie gliedert sich dadurch in mehrere Teile, da die Lernmaterialien nach deren Anpassung erneut getestet und hinsichtlich der gemachten Fehler miteinander verglichen werden.

Der erste Teil der Hauptstudie wird mit 7 Schülerinnen und 6 Schülern und somit insgesamt 13 Probanden durchgeführt, die im Alter von 10 bis 13 Jahren sind.⁶⁴ Der Hauptteil der Probanden ist 12 Jahre alt ($\varphi = 4$, $\sigma = 4$), 3 der Probanden befinden sich in einem Alter von 13 Jahren ($\varphi = 2$, $\sigma = 1$), eine Probandin ist 11 Jahre und ein Proband 10 Jahre alt. Das Durchschnittsalter liegt damit bei $\bar{O} = 12$ Jahren. 3 Probanden ($\varphi = 2$, $\sigma = 1$) befinden sich in der 6. und 10 Probanden ($\varphi = 5$, $\sigma = 5$) in der 7. gymnasialen Klassenstufe. Die Schüler besuchen unterschiedliche Gymnasien, um eine möglichst breite Stichprobe zu gewährleisten.

5.3.1 Auswertung

Bei der Auswertung wird genauso vorgegangen wie in der Vorstudie: Es werden einfache Transkripte der Interviews angefertigt und die Fehler, die die Schüler beim Bearbeiten der Lernmaterialien und beim Ausfüllen des Wissenstests machen, werden herausgefiltert. Die Interviews werden

⁶⁴ Durchgeführt wird die Studie zwar mit insgesamt 14 Probanden ($\varphi = 7$, $\sigma = 7$), jedoch sind sowohl die ausgefüllten Lernmaterialien als auch das Interview eines männlichen Probanden (11 Jahre, 6. Klasse) unbrauchbar, da er zu jeder Aufgabe schreibt, dass er sie nicht verstanden hat, keinen Versuch unternimmt, die Aufgaben zu lösen und auch im Interview keine Äußerung zum Nicht-Verstehen machen möchte.

in Kombination mit den ausgefüllten Lernmaterialien in Kategorien eingeteilt, die sich in einem ersten Schritt darauf beziehen, welche Teile der Lernmaterialien *bestehen bleiben können* und welche Abschnitte *verbessert werden sollten*. In die Kategorie *muss verbessert werden* fallen Aussagen, die sich auf eine Unverständlichkeit oder Schwierigkeit beziehen. In einem zweiten Schritt werden die Aussagen innerhalb dieser Kategorie den Passagen in den Lernmaterialien zugeordnet. Das Codesystem mit den Kürzeln für die einzelnen Abschnitte der Lernmaterialien wird entsprechend der Veränderungen in diesen angepasst.⁶⁵ Pro Proband wird jede als schwierig oder unverständlich empfundene Passage gezählt. Bei mehrfacher Nennung derselben Passage wird diese pro Proband nur einmal gewertet.

Es werden die Häufigkeiten der begangenen Fehler und ausgelassenen Aufgaben in den Lernmaterialien und der als schwierig oder unverständlich empfundenen Passagen bestimmt. Mit dem Interview wird jedoch vielmehr das Ziel verfolgt, Hinweise für Gründe der aufgetretenen Schwierigkeiten zu bekommen, um dementsprechend Änderungen in den Lernmaterialien vornehmen zu können. Dazu werden aus den Aussagen zu verbesserungswürdigen Passagen Begründungen beziehungsweise Ursachen für die Erschwernisse herausgefiltert. Für den Wissenstest werden ebenfalls die gemachten Fehler erfasst. Zusammengefasst können die Häufigkeiten der Fehler und der fehlenden Aufgaben innerhalb der Lernmaterialien und des Wissenstests festgehalten werden. Für die quantitative Analyse der Interviews kann ebenfalls die Anzahl der Probanden erfasst werden, die die entsprechenden Passagen der Lernmaterialien als schwierig empfinden.

5.3.2 Beschreibung der Ergebnisse

Folgende Abbildung 5.2 zeigt die absolute Häufigkeit der Probanden, denen beim Bearbeiten der Aufgaben in den Lernmaterialien Fehler unterlaufen (falsch) und die Aufgaben auslassen (fehlt). Dargestellt ist zudem, welche Aufgaben von den Probanden innerhalb der Interviews als schwierig empfunden werden. Zudem sind in Abbildung 5.3 die Fehler der Probanden im Wissenstest dargestellt. Aufgetragen ist die absolute Häufigkeit der Probanden über die einzelnen Aufgaben. Zudem ist in Tabelle

⁶⁵ Eine Auflistung und Beschreibung der Kürzel für die zweite Version der Lernmaterialien befindet sich im Anhang auf Seite 241.

5.3 dargestellt, welche Abschnitte der Lernmaterialien neben den Aufgaben von den Probanden als schwierig empfunden werden.

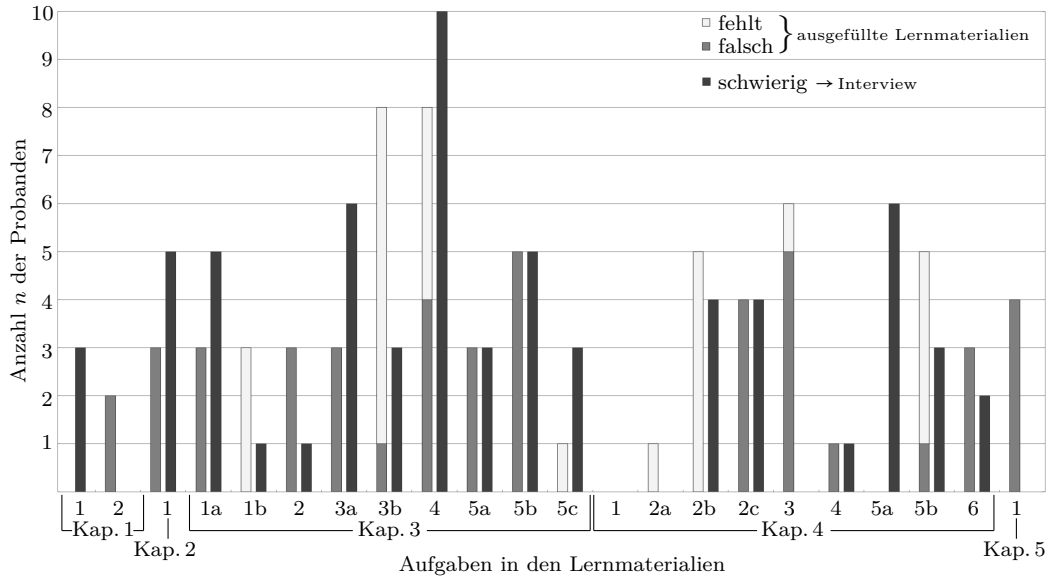


Abbildung 5.2: Hauptstudie Teil I – Anzahl der aufgetretenen Fehler und Erschwernisse innerhalb der einzelnen Aufgaben beim Bearbeiten der Lernmaterialien.

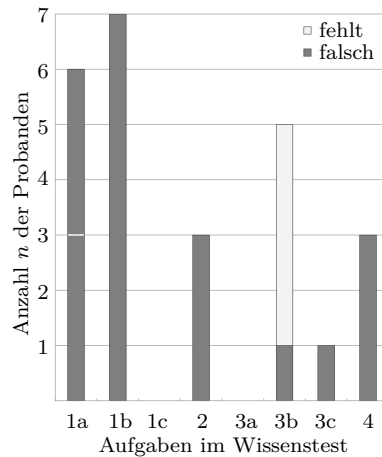


Abbildung 5.3: Hauptstudie Teil I – Anzahl der aufgetretenen Fehler innerhalb der einzelnen Aufgaben beim Bearbeiten des Wissenstests.

Die folgende Beschreibung der Ergebnisse bezieht sich auf die Häufigkeitsdiagramme (Abbildung 5.2 und 5.3).

Es wird deutlich, dass in jedem Kapitel der Lernmaterialien Fehler gemacht oder Aufgaben ausgelassen werden und dass in jedem Kapitel Aufgaben vorhanden sind, die von den Probanden als schwierig eingeschätzt werden. Es gibt jedoch Aufgaben, die von allen Probanden kor-

Tabelle 5.3: Hauptstudie Teil I – Weitere Erschwernisse in den Lernmaterialien.

Kürzel	Kurzbeschreibung	Anzahl
1T2	Tim vor dem Spiegel	1
1I2b	Abbildung: Querschnitt des Auges	1
2I1b	Abbildung: Lichtstrahlen im Wald	1
3T1	Tim im Wartezimmer	1
3I2b	Abbildung: Konstruktion der 3 Teilstrahlen	1
3A3Tipp	Beginne mit dem 2. Teilstrahl	2
3I4c	Weiterleitung ans Gehirn	1
4T1	Tim beim Augenarzt	2
5I2	Linsenformen (gesamt)	2
5A1Bild	Abbildung im Lückentext	1

rekt gelöst werden. Dabei handelt es sich um die erste Aufgabe im ersten Kapitel (1A1), in der die Schüler eine Vermutung aufstellen sollen, warum der Protagonist der Geschichte einen Augenarzt aufsuchen sollte. Allerdings muss bei dieser Aufgabe beachtet werden, dass keine der Antworten, insofern sie sich auf die Geschichte über den Protagonisten bezieht, als falsch angesehen wird (vgl. S. 120). Aus den Interviews geht allerdings hervor, dass zwei der Probanden diese Aufgabe als schwierig einstufen, wobei ein Proband die Schwierigkeit damit begründet, dass zu wenig Platz für die Antwort vorhanden ist (vgl. Interview II zu Kap. 1-3 #00:02:44-2# - #00:02:46-4#). Der andere Proband empfindet das Aufstellen einer Vermutung generell als schwierig, kann dies aber nicht begründen (vgl. Interview I zu Kap. 1-3 #00:03:05-6# - #00:03:20-6#). Die erste Aufgabe des vierten Kapitels (4A1), in der die Schüler das Ergebnis des Sehtests zuordnen sollen, indem sie entscheiden, ob der Protagonist der Geschichte die Gegenstände in der Ferne oder in der Nähe schlecht erkennen kann, wird von allen Probanden korrekt gelöst und von keinem Probanden als schwierig empfunden. Zudem lösen alle Probanden den zeichnerischen Teil der letzten Aufgabe des vierten Kapitels (4A5a) korrekt. Hier sollen die Schüler die drei Teilstrahlen mit verschobener Netzhaut vervollständigen. Allerdings empfinden fünf Probanden das Zeichnen der Teilstrahlen als schwierig, weil ihnen beispielsweise unklar ist, ob die Teilstrahlen auf einen Punkt zulaufen (vgl. Interview II zu Kap. 1-3 #00:02:41-3# - #00:03:55-8#) oder ihnen der Begriff Teilstrahlen nicht bekannt ist (vgl. Interview III zu Kap. 1-3 #00:06:48-3# - #00:07:17-1#). Das Zeichnen der drei Teilstrahlen im Wissenstest (Test A3a) wird jedoch ebenfalls von allen Pro-

banden korrekt gelöst. Zwei Teilaufgaben innerhalb der Lernmaterialien werden von jeweils einem Probanden ausgelassen: Die letzte Aufgabe des dritten Kapitels (3A5c), in der die Probanden erklären sollen, warum wir unsere Umwelt respektive den Baum trotzdem richtig herum wahrnehmen. Drei Probanden geben in den Interviews an, dass sie diese Aufgabe als schwierig empfinden, weil sie das Phänomen des umgekehrten Bildes nicht verstehen (vgl. z. B. Interview IV zu Kap. 1-3 #00:01:21-7#). Diese Erklärung wird im Wissenstest (Test A1c) von allen Probanden korrekt angeführt. Und die erste Teilaufgabe der zweiten Aufgabe im vierten Kapitel (4A2a), in der die Schüler den Punkt auf der Netzhaut markieren sollen, an dem sich drei Teilstrahlen treffen, wird ebenfalls nur von einem Probanden ausgelassen, von den restlichen aber korrekt gelöst und von keinem Probanden als schwierig empfunden.

Für die Verbesserung der Lernmaterialien sind jedoch diejenigen Aufgaben interessant, bei denen die Probanden Fehler begehen oder die nicht bearbeitet werden. Hervorzuheben ist dabei die dritte Aufgabe des dritten Kapitels (3A3), welche im Vorfeld aus den Ergebnissen der Vorstudie durch einen Tipp ergänzt wird. Den ersten Teil dieser Aufgabe (3A3a), in der die Probanden die drei Teilstrahlen zeichnerisch vervollständigen sollen, lösen drei Probanden fehlerhaft. Diese Aufgabe wird zudem von sechs Probanden (46,2%) als schwierig eingestuft. Dabei handelt es sich um Fehler und Schwierigkeiten, die mit den Fehlern aus der Vorstudie vergleichbar sind:

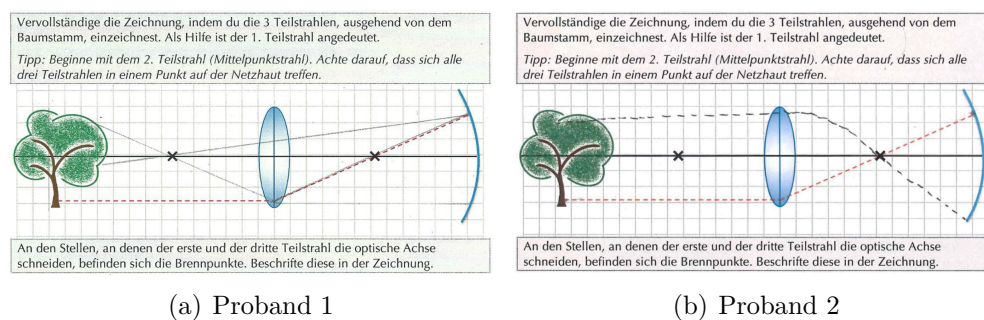


Abbildung 5.4: Hauptstudie Teil I – Fehler beim Einzeichnen der drei Teilstrahlen in Kapitel 3.⁶⁶

Die Schüler orientieren sich zwar an der Abbildung zuvor, die als Lösungsbeispiel dienen soll, sind jedoch verwirrt, weil die Teilstrahlen nicht

⁶⁶ Der dritte Proband, der die Teilstrahlen falsch einzeichnet, begeht denselben Fehler wie Proband 2.

mehr von der Baumkrone ausgehen, sondern vom Baumstamm (vgl. z. B. Interview V zu Kap. 1-3 #00:01:42-6# - #00:02:09-3# und Interview IV zu Kap. 1-3 #00:05:05-2# - #00:05:24-7#). Proband 2 orientiert sich beim Zeichnen eher an der unter der Aufgabe befindlichen Abbildung (3I4b). Im vierten Kapitel (4A5a) sowie im Wissenstest (Test A3a) sind jedoch auch die drei Probanden in der Lage, die Teilstrahlen korrekt einzuzeichnen, allerdings werden diese wieder von der Baumkrone respektive vom oberen Teil des Stoppschildes ausgehend konstruiert, sodass die Schwierigkeit dieser Aufgabe im dritten Kapitel für die drei Probanden in dem veränderten Ausgangspunkt der Teilstrahlen begründet liegt. Da nur drei der 13 Probanden Schwierigkeiten beim Vervollständigen der drei Teilstrahlen in der dritten Aufgabe des dritten Kapitels (3A3a) haben und nur ein Proband den ergänzten Tipp als nicht hilfreich empfindet (vgl. Interview IV zu Kap. 1-3 #00:00:33-6# - #00:00:37-7#, Tabelle 5.3), scheint dieser für die restlichen Schüler hilfreich zu sein. Das Vervollständigen der drei Teilstrahlen scheint viele kognitive Ressourcen der Schüler in Anspruch zu nehmen. Dies könnte eine Begründung für die hohe Fehlerquote (8 Probanden, 61,5%) der zweiten Teilaufgabe (3A3b) sein, in der die Probanden die Brennpunkte beschriften sollen. Sieben Probanden beschriften die Brennpunkte nicht und ein Proband beschriftet diese fehlerhaft. Aus den Interviews wird deutlich, dass den Probanden nicht aufgefallen ist, dass sie diese Aufgabe nicht bearbeitet haben. Da der Schwierigkeitsgrad dieser Teilaufgabe als gering einzustufen ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Schüler diese Aufgabe lediglich übersehen. Die Probanden scheinen sich beim Lösen der Aufgabe auf das Konstruieren der Teilstrahlen zu konzentrieren und überlesen die darunter stehende Aufgabe. Diese Tatsache lässt sich durch den zweiten Teil der fünften Aufgabe im vierten Kapitel (4A5b) stützen, in dem die Probanden nach dem Vervollständigen und Konstruieren der drei Teilstrahlen (bei verschobener Netzhaut) die Brennpunkte einzeichnen sollen. Vier Probanden zeichnen die Brennpunkte nicht ein und ein Proband fehlerhaft. Gleiches spiegelt sich in dem zweiten Teil der dritten Aufgabe im Wissenstest (Test A3b) wider, in dem die Schüler nach der Konstruktion der drei Teilstrahlen die Brennpunkte einzeichnen und beschriften sollen. Hier zeichnet ein Proband die Brennpunkte falsch ein und vier Probanden lassen diese Aufgabe aus beziehungsweise lösen sie unvollständig. Drei dieser vier Probanden zeichnen die Brennpunkte zwar korrekt ein, beschriften diese aber

nicht. Ein Proband schlägt vor, die Aufgaben zu nummerieren, um einem Übersehen einzelner Aufgaben vorzubeugen (vgl. Interview IV zu Kap. 1-3 #00:06:38-3#).

Die vierte Aufgabe des dritten Kapitels (3A4), in der die Probanden, gemäß des Zielfreiheitseffektes, die Abbildung mit möglichst vielen Begriffen beschriften sollen, wird von vier Probanden fehlerhaft gelöst und von vier weiteren Probanden ausgelassen, wobei es sich wieder um eine Fehlerquote von 61,5% handelt. Zudem wird die Aufgabe von zehn Probanden als schwierig eingestuft. Die Schüler begründen das Auslassen und die erhöhte Schwierigkeit der Aufgabe damit, dass sie nicht wussten, welche und wieviele Begriffe sie eintragen sollten (vgl. z. B. Interview III zu Kap. 1-3 #00:01:09-9# - #00:01:11-3# und Interview VII zu Kap. 1-3 #00:09:50-3# - #00:10:03-6#) oder dass sie die Aufgabe übersehen haben (vgl. z. B. Interview V zu Kap. 1-3 #00:06:46-5# - #00:06:56-5#). Diese Aufgabe wird zudem wegen der Unklarheit, welche Begriffe eingetragen werden sollen, als eine der schwierigsten Aufgaben eingeschätzt (vgl. z. B. Interview VI zu Kap. 1-3 #00:03:46-1# - #00:04:10-5#).

Die direkt darauf folgende fünfte Aufgabe des dritten Kapitels, die sich in drei Teilaufgaben gliedert (3A5a, b, c), ist durch eine hohe Fehlerquote gekennzeichnet und wird zudem als schwierig empfunden. Dies betrifft besonders die ersten beiden Teilaufgaben, in denen die Probanden zunächst die Netzhaut als den Bestandteil des menschlichen Auges herausstellen sollen, auf dem das umgekehrte Bild entsteht und danach die Linse für das umgekehrte Bild verantwortlich machen sollen. Drei Probanden lösen die erste Teilaufgabe (3A5a) falsch und die zweite Teilaufgabe (3A5b) wird von fünf Probanden falsch gelöst. Ebenso viele Probanden schätzen die beiden Aufgabenteile als schwierig ein. Beide Teilaufgaben sorgen bei den Probanden für Verwirrungen, da die Antwortmöglichkeiten dieselben sind (vgl. z. B. Interview V zu Kap. 1-3 #00:05:54-9# - #00:06:22-3#). Die hohe Fehlerquote bei derselben Aufgabe im Wissenstest (Test A1b), die mit sieben Probanden bei 53,9% liegt, bestätigt, dass die Inhalte für die Schüler schwierig zu verstehen sind. Die Schüler haben die Inhalte nicht verstanden und diejenigen, die diese Aufgabe in den Lernmaterialien korrekt lösen, können die Inhalte nicht behalten. Zudem wird die Passage der Lernmaterialien, in der erklärt wird, dass das menschliche Gehirn die eingehenden Informationen so verrechnet, dass die Umwelt nicht auf dem Kopf stehend wahrgenommen wird, von einem Probanden

als schwierig eingestuft (3I4c). Ebenso wird der Advance Organizer zum dritten Kapitel, in dem die Geschichte über den Protagonisten weitergeführt wird, indem dieser im Wartezimmer des Augenarztes sitzt und in einer Zeitschrift auf das Phänomen der umgekehrten Umwelt trifft, von einem weiteren Probanden als schwierig empfunden (3T1). Werden diese Inhalte in Kombination mit der Fehlerquote und der Einschätzung zu den zugehörigen Aufgaben betrachtet, kann darauf geschlossen werden, dass der Schwierigkeitsgrad der Inhalte und der Rahmengeschichte nicht passend ist.

Das vierte Kapitel der Lernmaterialien zeichnet sich besonders dadurch aus, dass die einzelnen Aufgaben den Schülern die Möglichkeit bieten, sich selbst zu überprüfen. Es geht dabei vorrangig um den Zusammenhang zwischen dem Entstehen eines scharfen Bildpunktes auf der Netzhaut in Abhängigkeit von der Länge des Augapfels und damit dem Abstand zwischen Linse und Netzhaut. Besonders hervorzuheben hinsichtlich

der Fehlerquote sind dabei die zweite und dritte Aufgabe dieses Kapitels (4A2, 4A3). Die aufgetretenen Fehler innerhalb dieser Aufgaben scheinen in Abhängigkeit voneinander zu stehen. Die zweite Aufgabe gliedert sich in drei Teile, wobei im ersten Teil zunächst der Punkt auf der Netzhaut markiert werden soll, an dem sich die drei Teilstrahlen treffen.

Markiere den Punkt in der Zeichnung, an dem sich die drei Teilstrahlen auf der Netzhaut treffen.

Verändere die Position der Netzhaut, indem du sie ...

a) ca. 2 Kästchen weiter links zeichnest. **fehlt**
 Treffen sich die Teilstrahlen auf der Netzhaut in einem Punkt? nein
 weil der Abstand zwischen Linse und Netzhaut zu klein (groß/klein) ist.
 Der Augapfel ist hier zu lang (kurz/lang). **falsch**

b) ca. 2 Kästchen weiter rechts zeichnest. Verlängere außerdem die drei Teilstrahlen, sodass sie auf die Netzhaut treffen. **fehlt**
 Treffen sich die Teilstrahlen auf der Netzhaut in einem Punkt? nein
 weil der Abstand zwischen Linse und Netzhaut zu groß (groß/klein) ist.
 Der Augapfel ist hier zu kurz (kurz/lang). **falsch**

Abbildung 5.5: Hauptstudie Teil I – Fehler beim Verändern der Position der Netzhaut und beim Ausfüllen der Lücken in Kapitel 4.

Wie bereits beschrieben, wird diese Aufgabe von einem Probanden ausgelassen, von den restlichen korrekt gelöst und von keinem Probanden als schwierig empfunden. Der zweite Teil der Aufgabe (4A2b), der sich auf das Zeichnen der beiden veränderten Positionen der Netzhaut bezieht, wird von fünf Probanden (38,5%) ausgelassen. Vier der fünf Probanden lösen die dritte Teilaufgabe fehlerhaft, indem sie die dazugehörigen Lücken falsch ausfüllen. Aus den Interviews wird deutlich, dass die Aufgaben-

stellung, die Position der Netzhaut zeichnerisch zu verändern, übersehen wird (vgl. z. B. Interview II zu Kap. 4 & 5 #00:01:59-0# - #00:02:14-3#). Zudem schätzen jeweils vier Probanden sowohl das Zeichnen als auch das Ausfüllen der Lücken als schwierig ein. Sie begründen die Schwierigkeit damit, dass sie nicht wussten, was in die ersten Lücken eingetragen werden soll (vgl. Interview V zu Kap. 4 & 5 #00:00:59-4# - #00:01:02-6#). Deutlich wird, dass die Probanden, die die Lücken fehlerhaft ausfüllen, auch zuvor die Position der Netzhaut nicht zeichnerisch verändert haben. Gleiches lässt sich auf die darauf folgende Aufgabe beziehen, in der die Schüler entscheiden sollen, welche Position der zuvor gezeichneten Netzhaut der des Protagonisten entspricht und ob dessen Augapfel zu lang oder zu kurz ist (4A3). Diejenigen Probanden, die in der Aufgabe zuvor die Zeichnung der Netzhaut ausgelassen haben, begehen bei der Zuordnung in der dritten Aufgabe Fehler oder lassen diese aus (6 Probanden, 46,2%). Den Schülern ist die fehlerhafte Zuordnung nicht bewusst, da keiner der Probanden diese Aufgabe als schwierig oder unverständlich empfindet. Aus diesen gemachten Fehlern resultieren auch die Fehler im Lückentext des fünften Kapitels (5A1). Die gemachten Fehler im Lückentext der vier Probanden beziehen sich dabei auf den Zusammenhang zwischen der Länge des Augapfels und dem Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut. Diese Fehler unterlaufen jedoch nur denjenigen Probanden, die bereits im vorigen vierten Kapitel diesen Zusammenhang fehlerhaft herausstellen. Da den Probanden nicht bewusst ist, dass sie eine fehlerhafte Zuordnung getroffen haben, begehen sie auch im Wissenstest in der vierten Aufgabe dieselben Fehler (Test A4). Mit dieser Aufgabe wird die Transferleistung der Schüler überprüft (vgl. S. 139). Dadurch, dass die Probanden die Fehler konsequent durchziehen, kann darauf geschlossen werden, dass sie die Inhalte durch die Lernmaterialien zumindest über einen kurzen Zeitraum behalten können, es allerdings zu einer Verständnisillusion kommt und sie sich dadurch die Inhalte fehlerhaft einprägen.

Wie bereits angeführt, übersehen die Probanden mehrfach die Aufgabenstellung, die Brennpunkte nach der Konstruktion der drei Teilstrahlen einzuzeichnen. Im vierten Kapitel (4A5b) führt das Fehlen beziehungsweise das fehlerhafte Einzeichnen der Brennpunkte zu Fehlern in der darauf folgenden Aufgabe (4A6). Drei Probanden lösen diese falsch und erkennen damit nicht, dass sich die Brennpunkte verschieben müssen, damit

ein scharfer Bildpunkt entsteht, wenn sich der Abstand zwischen der Linse und Netzhaut ändert. Jeweils zwei Probanden schätzen das Zeichnen der Brennpunkte (4A5b) und die darauf folgende sechste Aufgabe (4A6) als schwierig ein. Ein Proband betont, dass aus den Lernmaterialien nicht hervorgeht, was ein Brennpunkt ist und wo sich diese befinden (vgl. Interview III zu Kap. 4 & 5 #00:03:20-3# - #00:03:29-8#). Dies lässt darauf schließen, dass dieser Proband die zweite Teilaufgabe der dritten Aufgabe im dritten Kapitel (3A3b), in der die Position der Brennpunkte erklärt wird, übersieht. Zudem fällt einem Probanden nicht auf, dass bei der fünften Aufgabe (4A5) die Netzhaut verschoben ist (vgl. Interview VI zu Kap. 4 & 5 #00:04:19-3# - #00:04:34-2#), womit die Unverständlichkeit der sechsten Aufgabe (4A6) begründet werden kann. Ein weiterer Proband versteht nicht, warum sich die Netzhaut verschieben sollte und empfindet aufgrund dessen die Aufgabe als schwierig (vgl. Interview VIII zu Kap. 4 & 5 #00:01:51-3# - #00:02:30-3#). Zum Lösen der Aufgabe schaut dieser Proband in die Lösungen (vgl. ebd. #00:04:10-7# - #00:04:12-4#).

Auffällig ist die Fehlerquote der ersten Aufgabe im Wissenstest (Test A1), die mit sechs Probanden bei 38,5% liegt. In dieser Aufgabe sollen die Schüler den Querschnitt des Auges mit den fünf Begriffen Iris, Pupille, Linse, Netzhaut und Sehnerv beschriften. Wenn dabei allerdings der Fokus auf die Begriffe Linse und Netzhaut gelegt wird, wird deutlich, dass drei der sechs Probanden nur diese beiden Begriffe korrekt eintragen. Die Begriffe ‚Linse‘ und ‚Netzhaut‘ sowie ihre Positionen im Querschnitt des menschlichen Auges wird von den Schülern sowohl verstanden als auch behalten. Die Begriffe ‚Linse‘ und ‚Netzhaut‘ werden im Lernmaterial häufig wiederholt und sind für das Verständnis der Inhalte von zentraler Bedeutung. Bei dieser Aufgabe im Wissenstest ist es daher wichtig, dass die Schüler diese beiden Begriffe korrekt eintragen. Bei den drei Probanden, die die Begriffe falsch eintragen, taucht der Begriff des Augapfels auf, sodass darauf geschlossen werden kann, dass den Schülern nicht deutlich wird, dass der Begriff des Augapfels ein Synonym für das menschliche Auge ist. Ein Proband führt im Interview aus, dass der Querschnitt des menschlichen Auges unverständlich sei (1I2b; vgl. Interview IV zu Kap. 1-3 #00:07:50-3# - #00:08:36-3#).

Die Aufgabe im zweiten Kapitel (2A1), in der die Schüler den Weg des Lichts von der Taschenlampe zur Tür und wieder zurück zum Protagonisten der Geschichte einzeichnen sollen, wird von drei Probanden

falsch gelöst. Dieselben Probanden zeichnen den Weg des Lichts auch im dritten Kapitel (3A1a) und im Wissenstest (Test A2) falsch ein. Zudem werden diese Aufgaben von jeweils vier Probanden als schwierig empfunden. So sind sie sich generell unsicher, welchen Weg das Licht nimmt und ein Proband schlägt vor, dass vorgegeben werden sollte, ob der Weg des Lichts in Pfeilform gezeichnet werden soll (vgl. Interview II zu Kap. 1-3 #00:05:13-2# - #00:05:29-1#). Damit wird eine zusätzliche Auffälligkeit angesprochen, die mit der Lösung dieser Aufgaben zusammenhängt: Sieben Probanden (53,9%) zeichnen nicht in Form von Pfeilen. Es wird somit aus der Lösung der Aufgaben nicht deutlich, wie das Licht verläuft.

Der Fehler eines Probanden beim Einzeichnen des Wegs des Lichts liegt in der Fehlvorstellung der Sehstrahlen begründet (vgl. S. 116). Dieser Proband verwendet die Sehstrahlen in allen Aufgaben, in denen der Weg des Lichts gezeichnet werden soll. Dabei handelt es sich um die Aufgabe im zweiten Kapitel (2A1), um die erste Aufgabe im dritten Kapitel (3A1a) und um die zweite Aufgabe im Wissenstest (Test A2).

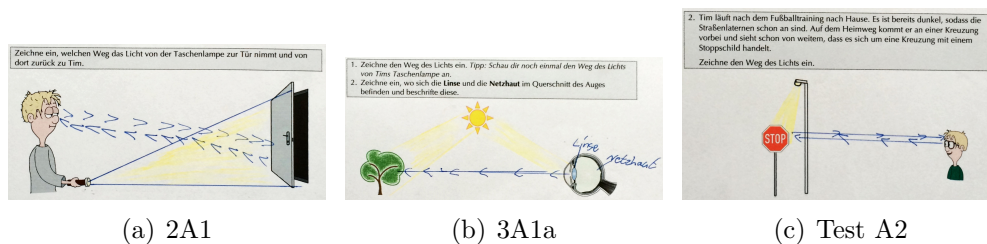


Abbildung 5.6: Hauptstudie Teil I – Fehler eines Probanden beim Einzeichnen des Weg des Lichts durch die Fehlvorstellung von Sehstrahlen.

Dieser Proband bestätigt im Interview seine Fehlvorstellung, indem er sagt, „dass das Auge sowas wie einen Akku hat“ (Interview VIII zu Kap. 1-3 #00:03:25-8#), der durch die Sonne aufgeladen wird und das Auge von selbst leuchten lässt (vgl. ebd.). Diese Fehlvorstellung wird während des Bearbeitens der Lernmaterialien zwar nicht abgelegt, jedoch führt diese Vorstellung nicht zu Folgefehlern innerhalb der anderen Aufgaben.

Bei den Aufgaben, die zeichnerisch gelöst werden sollen – sowohl in den Lernmaterialien als auch im Wissenstest – fällt auf, dass sieben Probanden und damit 53,9% kein Lineal verwenden. Dadurch gestaltet sich das Konstruieren der drei Teilstrahlen für die Probanden schwierig, da (wie in untenstehender Abbildung 5.7) der dritte Teilstrahl im Bereich zwischen der Linse und der Netzhaut nicht parallel zur optischen Achse gezeichnet wird. In den weiteren Aufgaben,

in denen die Probanden die Teilstrahlen konstruieren sollen, zeichnen sie auch den ersten Teilstrahl im Bereich vor der Linse nicht parallel zur optischen Achse. Dadurch ist sowohl das Einzeichnen der Brennpunkte als auch des Treffpunktes der drei Teilstrahlen auf der Netzhaut ungenau. Zum Konstruieren der Teilstrahlen

gilt es zusätzlich zu erwähnen, dass zwei Probanden (vgl. z. B. Abbildung 5.4 (b) Proband 2, S. 163) die Teilstrahlen in Form von gestrichelten Linien zeichnen. Dadurch wird die Zeichnung ebenfalls ungenau.

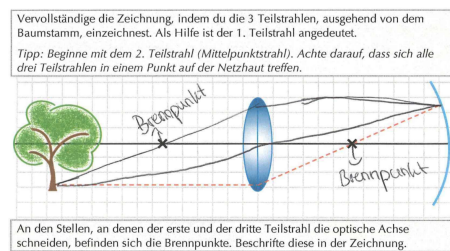


Abbildung 5.7: Hauptstudie Teil I – Zeichnen der drei Teilstrahlen ohne Lineal in Kapitel 3.

5.3.3 Reliabilitätstest

Um eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Auswertung machen zu können, werden die Daten von einer zweiten Person parallel codiert. Die Inter-Coder-Reliabilitätsprüfung findet mit der gesamten Datenmenge statt. Sowohl für die Auswertung der Lernmaterialien und des Wissenstests als auch für die quantitative Inhaltsanalyse der Interviews wird die Reliabilität über den **Cohens Kappa**-Wert berechnet. Bei diesem Vergleich beider Codierungen werden sowohl die Reihenfolge der Codierungen als auch zufällige Übereinstimmungen berücksichtigt (vgl. Zierer et al. 2013, S. 129). Für die Berechnung des Reliabilitätskoeffizienten κ gilt (vgl. Bortz & Döring 2006, S. 277):

$$\kappa = \frac{p_{\ddot{u}} - p_e}{1 - p_e} \quad (5.1)$$

mit $p_{\ddot{u}}$ als Maß der übereinstimmenden Codierungen und p_e als Maß der erwarteten zufälligen Übereinstimmungen. Diese lassen sich mittels einer Kreuztabelle bestimmen. Liegt der so berechnete Reliabilitätskoeffizient κ über einem Wert von 0,6 wird die Reliabilität als *gut* bezeichnet. Liegt dieser über einem Wert von 0,8, kann von einer *sehr guten* Reliabilität gesprochen werden. (Vgl. Zierer et al. 2013, S. 129)

Die Lernmaterialien werden von beiden Codierern mittels vorgefertigter Lösungen ausgewertet. Die Lösungen der einzelnen Aufgaben durch

die Probanden werden den Kategorien *korrekt*, *falsch* und *fehlt* zugeordnet.⁶⁷ Dabei ergibt sich folgende Kreuztabelle:

Tabelle 5.4: Hauptstudie Teil I – Kreuztabelle für die Beobachtungen beider Codierer in den Lernmaterialien.

		Codierer 1			Σ
		korrekt	falsch	fehlt	
Codierer 2	korrekt	205	0	0	205
	falsch	9	45	3	57
	fehlt	1	0	23	24
	Σ	215	45	26	286

Dazu werden die Aufgaben gezählt, die für die einzelnen Probanden von beiden Codierern als ‚korrekt‘ gewertet werden. Gleiches erfolgt mit denen, die beide Codierer als ‚falsch‘ und als ‚fehlt‘ kategorisieren. Diese Werte stehen auf der Diagonalen und sind für die Berechnung der übereinstimmenden Codierungen $p_{\ddot{u}}$ zentral. Für $p_{\ddot{u}}$ gilt (vgl. Bortz & Döring 2006, S. 277):

$$p_{\ddot{u}} = \frac{\sum_{j=1}^k f_{jj}}{n} \quad (5.2)$$

$$p_{\ddot{u}} = \frac{205 + 45 + 23}{286} = 0,955$$

Außerdem werden die Aufgaben gezählt, die von den Codierern unterschiedlich gewertet werden. Dabei gibt es beispielsweise den Fall, dass Codierer 1 die Aufgabe ‚korrekt‘ wertet, während Codierer 2 diese als ‚falsch‘ oder ‚fehlend‘ kategorisiert. Dies wird für jeden möglichen Fall gezählt. Diese Werte sind entscheidend, um die erwartete zufällige Übereinstimmung p_e beider Codierer zu bestimmen, für die gilt (vgl. ebd.):

$$p_e = \frac{1}{n^2} \sum f_{j \cdot} \cdot f_{\cdot j} \quad (5.3)$$

$$p_e = \frac{1}{286^2} (215 \cdot 205 + 45 \cdot 57 + 26 \cdot 24) = 0,578$$

Mit $p_{\ddot{u}}$ und p_e lässt sich nun der Reliabilitätskoeffizient κ aus Gleichung (5.1) bestimmen:

$$\kappa = \frac{0,955 - 0,578}{1 - 0,578} = \mathbf{0,893}$$

⁶⁷ Die Auswertungen beider Codierer befinden sich in tabellarischer Form im Anhang auf Seite 242ff.

An dieser Stelle kann von einer sehr guten Übereinstimmung beider Codierer gesprochen werden. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass es sich bei den Lernmaterialien zum größten Teil um geschlossene und halb-offene Aufgaben handelt, deren Auswertung mittels des Lösungsbogens kaum Abweichungen zulässt. Gleiches ist bei der Auswertung des Wissenstests zu erwarten, für den sich die folgende Kreuztabelle 5.5 ergibt.

Tabelle 5.5: Hauptstudie Teil I – Kreuztabelle für die Beobachtungen beider Codierer im Wissenstest.

		Codierer 1			Σ
		korrekt	falsch	fehlt	
Codierer 2	korrekt	77	0	0	77
	falsch	2	18	2	22
	fehlt	0	0	5	5
	Σ	79	18	7	104

Mit $p_{\ddot{u}} = 0,962$ und $p_e = 0,602$ ergibt sich mit Gleichung (5.1) für den Reliabilitätskoeffizienten $\kappa = \mathbf{0,905}$, sodass auch hier von einer sehr guten Reliabilität gesprochen werden kann.

Der Reliabilitätstest nach Cohen wird ebenso für die quantitative Analyse der Interviews durchgeführt. Die Aussagen der Probanden werden dabei entweder den Kategorien *sollte verbessert werden* oder *kann bestehen bleiben* zugeordnet, wobei die erstgenannte Kategorie auf die einzelnen Passagen der Lernmaterialien bezogen wird. Eine Passage der Lernmaterialien wird pro Proband, auch bei Mehrfachnennung, nur einmal gezählt. Bei dem Reliabilitätstest wird nicht überprüft, ob dieselben Transkriptstellen den einzelnen Passagen zugeordnet werden, sondern welcher Proband welche Passage als schwierig empfindet. Dabei ergibt sich folgende Kreuztabelle:

Tabelle 5.6: Hauptstudie Teil I – Kreuztabelle für die Beobachtungen beider Codierer bei der Analyse der Interviews.

		Codierer 1		Σ
		kann bestehen bleiben	sollte verbessert werden	
Codierer 2	kann bestehen bleiben	613	30	643
	sollte verbessert werden	19	53	72
	Σ	632	83	715

Mit $p_{\ddot{u}} = 0,927$ und $p_e = 0,807$ ergibt sich mit Gleichung (5.1) für den Reliabilitätskoeffizienten $\kappa = 0,622$. Damit handelt es sich um eine gute Reliabilität.

5.3.4 Zweite Anpassung der Lernmaterialien durch Interpretation der Ergebnisse

Auf Grundlage der Ergebnisse aus dem ersten Teil der Hauptstudie werden die Ergebnisse nun ein zweites Mal angepasst. Bei dieser Anpassung werden die Ergebnisse teilweise weiterführend interpretiert. Während die erste Anpassung nur geringfügige Änderungen beinhaltet, wird die zweite Anpassung durch die Anzahl der gemachten Fehler und die erwähnten Schwierigkeiten größere Veränderungen und Umstrukturierungen mit sich bringen. Es werden wieder einerseits formale und allgemeine Veränderungen der gesamten Lernmaterialien vorgenommen und andererseits werden die einzelnen Kapitel inhaltlich überarbeitet. Insbesondere das dritte und das vierte Kapitel werden angepasst.⁶⁸

Allgemeine Anpassung

Die Probanden begründen das Auslassen einiger Aufgaben damit, dass sie diese übersehen. Aus diesem Grund gilt es, die Lernmaterialien übersichtlicher zu strukturieren: Dazu werden zunächst die Kapitelüberschriften durchnummeriert, sodass sie mit den Kopfzeilen übereinstimmen. Außerdem werden die Aufgaben pro Kapitel durchnummeriert. Die Nummerierung beginnt bei jedem Kapitel von vorne. Da in Kapitel zwei und fünf jeweils nur eine Aufgabe vorhanden ist, werden diese nicht mit Ziffern versehen. Zudem werden die Textabschnitte, in denen die Geschichte des kurzsichtigen Jungen aufgegriffen wird, von den Textabschnitten abgegrenzt, die nur fachliche Informationen beinhalten. Die Textabschnitte, die nicht die Rahmengeschichte aufgreifen, werden mit einem grünen Kasten eingerahmt. Zuvor waren nur Merksätze und Zusammenfassungen in dieser Farbe umrandet. Die Geschichte über den kurzsichtigen Jungen, die sich durch die Lernmaterialien und die Aufgaben zieht, wird in Form eines Advance Organizer an den Anfang eines jeden Kapitels gesetzt. Um dies einheitlicher zu gestalten, werden die Kapitelüberschriften unter dem Advance Organizer positioniert. Diese Änderung wird im zweiten und dritten

⁶⁸ Die dritte Lernmaterialversion befindet sich im Anhang auf Seite 245ff.

Kapitel vorgenommen, sodass diese Kapitel auf die restlichen angepasst werden.

Um die Aufmerksamkeit der Probanden stärker auf die Aufgabenstellungen zu lenken und so einem Übersehen von Aufgaben entgegenzuwirken, werden diese wieder mit Symbolen versehen. Neben den Aufgabenstellungen wird ein Stiftsymbol positioniert. Dieses Symbol ist kleiner als das Symbol der Hand, die einen Stift hält, welches aus der Vorstudie bekannt ist. Damit ist es geeigneter für die Aufgaben, weil diejenigen Aufgaben, die zeichnerisch gelöst werden sollen und bei denen ein Lineal verwendet werden sollte, zusätzlich mit einem Symbol eines Lineals versehen werden. Die Schüler sollen dadurch dazu aufgefordert werden, ein Lineal bei der Zeichnung zu verwenden. Das Symbol der Hand, welches in der Vorstudie verwendet wird, würde hier zu viel Platz einnehmen.

Eine dritte allgemeine Anpassung der Lernmaterialien findet hinsichtlich der Konstruktion der drei Teilstrahlen statt. Die soeben beschriebene Veränderung des Hinzufügens des Linealsymbols soll die Probanden zu einem exakteren Zeichnen veranlassen. Zudem werden die Teilstrahlen nicht mehr in gestrichelter Form, sondern als durchgezogene Linien gezeichnet. Dadurch soll einem ungenauen Zeichnen durch gestrichelte Linien, die von den Schülern übernommen werden, vorgebeugt werden.

Anpassung von Kapitel 1 und 2

In den ersten beiden Kapiteln werden hauptsächlich geringfügige formale Anpassungen vorgenommen. Für die Antwort zur ersten Aufgabe im ersten Kapitel wird den Probanden mehr Platz zur Verfügung gestellt, um die Aufgabe stärker vom Text hervorzuheben. In dem ersten erklärenden Textabschnitt, in dem auf die Iris, die Pupille und die Lederhaut als sichtbare Bestandteile des äußeren Auges eingegangen wird, wird der Begriff des Augapfels nicht mehr fett markiert. Stattdessen werden die Begriffe Iris, Pupille und Lederhaut in der darunter stehenden zweiten Aufgabe fettgedruckt. Wie bereits in der allgemeinen Anpassung beschrieben, wird der Textabschnitt zum Querschnitt des menschlichen Auges mit einem grünen Rahmen versehen. Zudem werden die Fachbegriffe in dem gesamten Text fett markiert. Außerdem wird der Begriff des Augapfels in die Zeichnung des Querschnitts mit aufgenommen, um herauszustellen, dass der Begriff des Augapfels ein Synonym für das Auge ist. Außerdem wird der Text fachlich dadurch ergänzt, dass auch der Sehnerv von außen

nicht sichtbar ist, wodurch die abschließende Information an die einleitende anknüpft.

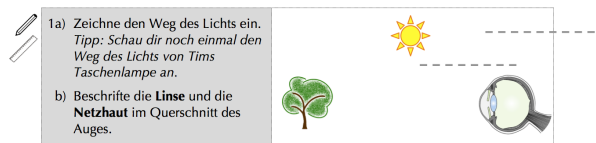
Im zweiten Kapitel wird der Advance Organizer mit einem Bild einer Taschenlampe versehen, um die Rahmengeschichte stärker abzugrenzen. Erst unter der einleitenden Geschichte steht die Kapitelüberschrift. Eine weitere Änderung in diesem Kapitel wird in der Aufgabe vorgenommen. Da 53,9% der Probanden im ersten Teil der Hauptstudie den Weg des Lichts nicht in Form von Pfeilen einzeichnen, wird unter die Aufgabenstellung ein Tipp positioniert, der darauf hinweist, dass *beide Wege jeweils als Pfeile* eingezeichnet werden sollen.

Anpassung von Kapitel 3

Die größte inhaltliche Veränderung der Lernmaterialien wird im dritten Kapitel vorgenommen. Die Schüler werden durch den Aufbau des Kapitels durcheinandergebracht und haben Schwierigkeiten beim Eintragen möglichst vieler Begriffe in die zusammenfassende Abbildung. Dies liegt einerseits an der zielfreien Aufgabe und andererseits an der veränderten Darstellung der Teilstrahlen. Es werden in dieser Abbildung nicht die Teilstrahlen eines Bildpunktes konstruiert, sondern jeweils die ersten Teilstrahlen des obersten und untersten Punkt des Gegenstandes, sodass ein komplettes Bild auf der Netzhaut erscheint. Außerdem wird den Schülern nicht deutlich, dass die Linse des menschlichen Auges für das umgekehrte Bild auf der Netzhaut verantwortlich ist. Die Lösung der Aufgaben scheint viele kognitive Ressourcen der Probanden in Anspruch zu nehmen, sodass sie die Aufgaben teilweise übersehen. Die Informationsdichte sowie die Elementinteraktivität scheinen in diesem Kapitel sehr hoch zu sein, wodurch eine hohe intrinsische kognitive Belastung nicht auszuschließen ist. Aus diesem Grund sollte der Fokus weniger auf der Umkehrung des Bildes, sondern vielmehr auf der Konstruktion der drei Teilstrahlen liegen. Zudem werden die Brennpunkte stärker herausgestellt. Dazu muss zunächst die alltagsnahe Geschichte umgeschrieben werden, wobei direkt an das zweite Kapitel angeknüpft wird:

Tagsüber braucht Tim keine Taschenlampe, weil das Licht der Sonne zum Sehen ausreicht. Die Sonnenstrahlen treffen auf die Gegenstände in unserer Umwelt und werden von diesen reflektiert. Wenn wir einen Baum betrachten, dann reflektiert der Baum das Licht der Sonne. Dieses reflektierte Licht trifft auf unsere Augen.

Durch diese Überleitung zum dritten Kapitel können die Schüler den zuvor gezeichneten Weg des Lichts überprüfen und die Inhalte vertiefen. Nach dem Advance Organizer bleibt die Aufgabe bestehen, dass der Weg des Lichts von der Sonne zu dem Baum und von dort aus zum Auge gezeichnet werden soll. Außerdem sollen die Linse und die Netzhaut im Querschnitt des Auges beschriftet werden. Dazu werden gestrichelte Linien eingefügt, damit die Schüler diesen zweiten Aufgabenteil nicht übersehen. Diese gesamte erste Aufgabe wird aus Platzgründen nebeneinander dargestellt, sodass auf derselben Seite das Zustandekommen der drei Teilstrahlen bei der Abbildung eines Bildpunktes auf der Netzhaut behandelt werden kann.



Danach wird der Weg des Lichts durch das Auge genauer thematisiert. Dazu wird das Konstruieren der drei Teilstrahlen schrittweise erklärt. Es wird zunächst wieder der Fokus auf die Linse und die Netzhaut gelegt. Im ersten Schritt wird die optische Achse als Begriff eingeführt und die Schüler werden dazu aufgefordert, die Linse und die Netzhaut erneut zu beschriften, sodass sie sich diese Begriffe besser einprägen. Um die Linse und die Netzhaut wird der Augapfel schemenhaft konstruiert. Dadurch soll deutlich werden, dass diese beiden Bestandteile des menschlichen Auges als optischer Apparat für das Sehen von zentraler Bedeutung sind. Im zweiten Schritt wird der erste Teilstrahl vom obersten Punkt des betrachteten Gegenstandes ausgehend konstruiert und dessen Verlauf wird kurz beschrieben. Außerdem wird die Position des bildseitigen Brennpunkts erklärt und die Schüler werden dazu aufgefordert, diesen zu beschriften. Im dritten

Auf der **Netzhaut** unserer Augen entsteht ein Abbild des Baumes. Dafür ist die **Linse** verantwortlich. Von jedem Punkt des Baumes werden die Lichtstrahlen der Sonne reflektiert. Dabei teilt sich jeder reflektierte Lichtstrahl in **3 Teilstrahlen** auf:

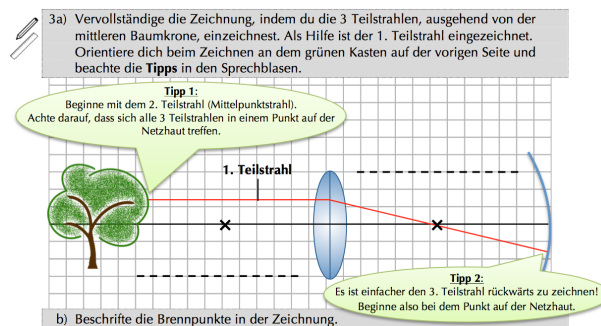
<p>optische Achse</p>	<p>Durch die Mitte der Pupille und der Linse verläuft die optische Achse und trifft auf die Mitte der Netzhaut.</p>
<p>1. Teilstrahl</p>	<p>Der 1. Teilstrahl schneidet die optische Achse zwischen der Linse und der Netzhaut. Hier befindet sich der Brennpunkt des 1. Teilstrahls.</p>
<p>2. Teilstrahl (Mittelpunktstrahl)</p>	<p>Der 2. Teilstrahl wird auch als Mittelpunktstrahl bezeichnet, weil er durch die Mitte der Linse verläuft.</p>
<p>3. Teilstrahl</p>	<p>Der 3. Teilstrahl schneidet die optische Achse zwischen der Linse und dem betrachteten Gegenstand. Hier liegt der Brennpunkt des 3. Teilstrahls.</p>

Schritt liegt der Fokus auf dem Mittelpunktstrahl. Und im vierten Schritt werden der dritte Teilstrahl und der gegenstandsseitige Brennpunkt beschrieben. Auch hier sollen die Schüler wieder den Brennpunkt beschriften. Es wird einerseits darauf geachtet, dass pro Erklärschritt nur eine neue Information aufgenommen und der Aufmerksamkeitsteilungseffekt durch die parallele Anordnung vermieden wird. Dadurch soll der Aufbau des Schemas zur Konstruktion der drei Teilstrahlen schrittweise erfolgen und vereinfacht werden.

Um dieses Schema und damit den Verlauf der drei Teilstrahlen zu wiederholen, sollen die Schüler in der auf die Erklärung folgende Aufgabe die drei Teilstrahlen vervollständigen. Es handelt sich dabei um eine Aufgabe entsprechend des Effekts der Problemvervollständigung. Den Schülern wird dabei eine maximale Hilfestellung gegeben, indem zum einen der erste Teilstrahl vorgegeben wird, die Brennpunkte bereits eingezeichnet sind und Tipps zum Zeichnen des zweiten und dritten Teilstrahls gegeben werden. Zum anderen werden die Schüler bereits in der Aufgabenstellung dazu aufgefordert, sich an dem grünen Kasten auf der vorigen Seite zu orientieren, der die sukzessiven Erklärschritte zur Konstruktion der Teilstrahlen enthält. In der Aufgabenstellung wird zudem auf die Tipps

in den grünen Sprechblasen hingewiesen. Der erste Tipp wird aus der vorigen Version des dritten Kapitels übernommen. Hinzu kommt ein zweiter Tipp, der die Schüler dazu auffordert, den dritten Teil-

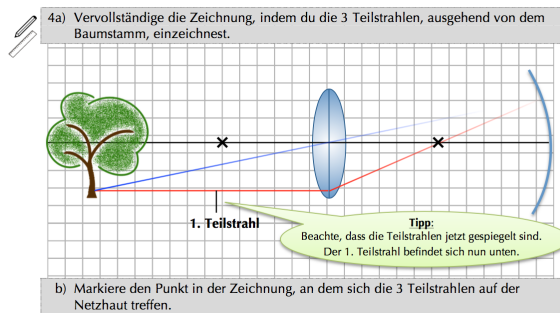
strahl rückwärts – also von der Netzhaut ausgehend – zu zeichnen. Die Teilstrahlen gehen hier von der obersten Hälfte des Gegenstandes aus, um die Schüler nicht durch eine veränderte Perspektive durcheinanderzubringen. Der Verlauf der Teilstrahlen soll sich durch dieses eigenständige Zeichnen festigen. Die Position der Tipps sollen das Arbeitsgedächtnis extrinsisch entlasten, indem der Aufmerksamkeitsteilungseffekt vermieden wird. Nachdem der zweite und dritte Teilstrahl konstruiert worden sind, sollen die Schüler im zweiten Aufgabenteil die Brennpunkte beschriften.



Damit diese Aufgabe nicht übersehen wird, werden gestrichelte Linien in der Nähe der Brennpunkte eingezeichnet.

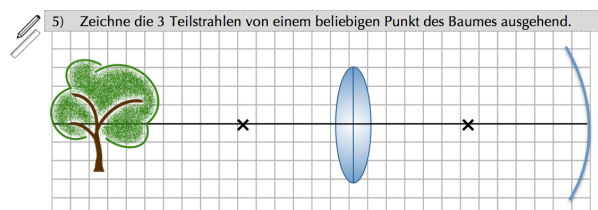
Die darauf folgende vierte Aufgabe wird ebenfalls aus der vorigen Version des dritten Kapitels übernommen und nur leicht modifiziert. Die Schüler sollen hier die Teilstrahlen vom untersten Punkt des Gegenstandes ausgehend vervollständigen. Dazu wird als Hilfestellung nicht nur der erste Teilstrahl angedeu-

tet und beschriftet, sondern auch der Mittelpunktstrahl. Zudem wird in der Sprechblase mit dem Tipp darauf hingewiesen, dass die Teilstrahlen nun an der optischen Achse gespiegelt werden.



Im zweiten Aufgabenteil sollen die Schüler den Punkt auf der Netzhaut markieren, an dem sich die drei Teilstrahlen treffen. Auch hier wird der Aufmerksamkeitsteilungseffekt durch die Position des Tipps vermieden. Innerhalb dieser Aufgabe sind jedoch weniger Hilfestellungen zu finden als in der vorigen dritten Aufgabe. Dies entspricht dem Effekt der abschwächenden Unterstützung, der dazu dient, die Schüler schrittweise an eine eigenständige Lösung heranzuführen.

Aus diesem Grund besteht die fünfte und letzte Aufgabe des dritten Kapitels aus der selbstständigen Konstruktion der drei Teilstrahlen von einem beliebigen Punkt des Baumes ausgehend.



Vorgegeben sind dabei beide Brennpunkte, die bei fester Position der Linse und der Netzhaut ebenfalls festgelegt sind. Die Brennpunkte dienen als Orientierungspunkte für den Verlauf des ersten und dritten Teilstrahls. Den Ausgangspunkt können die Schüler frei wählen, wodurch diese Aufgabenstellung dem Zielfreiheitseffekt ähnelt. Es werden keine zusätzlichen Hilfestellungen für die Konstruktion der Teilstrahlen gegeben, wodurch es sich bei dieser Aufgabe nicht mehr um

eine Vervollständigungsaufgabe, sondern um eine konventionelle Aufgabe handelt.

Anpassung von Kapitel 4 und 5

Die Schwierigkeiten im vierten Kapitel bestehen in der Verknüpfung der Sehschwäche mit deren Ursache. Der Zusammenhang zwischen der Länge des Augapfels, dem Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut und dem daraus resultierenden Sehfehler wird den Schülern nicht deutlich. Diese Schwierigkeit sorgt ebenfalls für Fehler im fünften Kapitel. Bevor Änderungen in den Lernmaterialien vorgenommen werden, die diese Schwierigkeit beheben sollen, muss der Anfang des Advanced Organizer umgeschrieben werden, damit die Geschichte über den kurzsichtigen Jungen stimmig weitergeführt wird:

Tim hat einen Termin beim Augenarzt. Er erzählt von seinen Kopfschmerzen, seitdem er seinen neuen Sitzplatz im hinteren Teil des Klassenraumes hat. . . .

Die Aufgabe nach dem ersten Teil des Advanced Organizers, in der die Schüler das Ergebnis des Sehtests einordnen sollen, indem sie entscheiden, ob der Protagonist der Geschichte Gegenstände in der Nähe oder in der Ferne schlecht erkennen kann, bleibt bestehen. Der zweite Teil des Advanced Organizers wird im Schlussteil leicht abgewandelt und mit einer zusätzlichen Aufgabe sowie einer Abbildung versehen. Die neben dem Text stehende Abbildung verdeutlicht den Unterschied zwischen einem zu langen und einem zu kurzen Augapfel.

Der Augenarzt bittet Tim, eine Brille aufzusetzen. Damit kann Tim auch die unterste Reihe viel besser erkennen. Tim ist überrascht und der Augenarzt erklärt ihm, dass er eine **Sehschwäche** hat. Genauer gesagt, ist **sein Augapfel zu lang**, sodass kein scharfes Bild entstehen kann.

2) Tims Augapfel ist zu lang, damit ist der Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut zu (groß/klein).

Dabei sind die Linse und die Netzhaut eingezeichnet und die Schüler sollen in der zweiten Aufgabe erkennen, dass der Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut bei einem zu langen Augapfel zu groß ist. Durch die Anordnung der Elemente wird der Effekt der geteilten Aufmerksamkeit vermieden.

Danach folgt die Aufgabe, in der die Schüler die Position der Netzhaut zeichnerisch verändern sollen. Hier wird der Arbeitsauftrag konkreter formuliert und fettgedruckt, sodass einem Übersehen der Aufgabenstellung entgegengewirkt wird. Außerdem sollen die Schüler die jeweils neu gezeich-

nete Netzhaut mit den Buchstaben a) und b) entsprechend der Teilaufgaben beschriftet. Außerdem wird in diese Aufgabe mit aufgenommen, dass die Schüler entscheiden müssen, welche der eingezeichneten Positionen der Netzhaut der des Protagonisten aus der Geschichte entspricht (Aufgabenteil c). Die Schüler können sich beim Ausfüllen der Lücken an der Abbildung zuvor und der darüber stehenden zweiten Aufgabe orientieren.

3) Markiere den Punkt, an dem sich die 3 Teilstrahlen auf der Netzhaut treffen.

4a) Zeichne eine zusätzliche Netzhaut ca. 2 Kästchen weiter links ein und beschrifte sie mit a).
 Treffen sich die Teilstrahlen auf der Netzhaut in einem Punkt?
 weil der Abstand zwischen Linse und Netzhaut zu (groß/klein) ist.
 Der Augapfel ist hier zu (kurz/lang).

b) Zeichne eine weitere Netzhaut ca. 2 Kästchen weiter rechts ein und beschrifte sie mit b).
 Verlängere außerdem die drei Teilstrahlen, sodass sie auf diese Netzhaut treffen.
 Treffen sich die Teilstrahlen auf der Netzhaut in einem Punkt?
 weil der Abstand zwischen Linse und Netzhaut zu (groß/klein) ist.
 Der Augapfel ist hier zu (kurz/lang).

c) Welche Position hat Tims Netzhaut in der Abbildung? (a/b)

Darauf folgt die Erklärung, dass weitsichtige Personen Gegenstände in der Nähe schlecht erkennen können, weil sie einen zu kurzen Augapfel haben und kurzsichtige Personen aufgrund des zu langen Augapfels Gegenstände in der Ferne schlecht erkennen können. Die Schüler sollen danach entscheiden, um welche Sehschwäche es sich bei dem Protagonisten aus der Geschichte handelt. Diese Erklärung sowie die Aufgabe bleiben aus der vorigen Version der Lernmaterialien bestehen.

Auch die darauf folgende Aufgabe, in der die Schüler die drei Teilstrahlen mit verschobener Netzhaut konstruieren sollen, bleibt zum größten Teil bestehen. Die Aufgabenstellung wird in zwei Teilaufgaben gegliedert. Zuvor wurde die Aufgabenstellung zum Einzeichnen der Brennpunkte von einigen Schülern übersehen. So ist diese als zweiter Aufgabenteil deutlicher hervorgehoben. Da die Schüler im dritten Kapitel bereits eigenständig

6a) Zeichne in beide Abbildungen die 3 Teilstrahlen ein, ausgehend von dem vorgegebenen Punkt an der Baumkrone. Beachte, dass sich die Teilstrahlen in einem Punkt auf der Netzhaut treffen müssen.

b) Zeichne auch die Brennpunkte ein.

Tipp 1:
 Beginne wieder mit dem 2. Teilstrahl (Mittelpunktstrahl). An dem Punkt, an dem der Mittelpunktstrahl auf die Netzhaut trifft, müssen die 3 Teilstrahlen zusammentreffen.

Tipp 2:
 Zeichne den 3. Teilstrahl wieder rückwärts.

7) Außer der Position der Netzhaut verändert sich die Position von ...
 der Linse.
 den Brennpunkten.
 dem Baum.

die Teilstrahlen konstruieren sollten, werden hier die Teilstrahlen nicht mehr angedeutet. Als Hilfestellungen sind aber die Punkte auf der Netzhaut eingezeichnet, an denen sich die drei Teilstrahlen treffen sollen. Zudem werden die Tipps aus dem dritten Kapitel wiederholt, damit sich die Schüler die Konstruktion der drei Teilstrahlen in Erinnerung rufen können. Damit wird der Imaginationseffekt der Cognitive Load Theorie angewendet.

Im fünften Kapitel werden nur formale Anpassungen vorgenommen. Die Erklärungen zur Sammel- und Zerstreuungslinse werden gemeinsam grün eingerahmt. Die Tatsache, dass sich die Brennpunkte verschieben müssen, wird fettgedruckt. Hinzugefügt wird, dass eine zusätzliche Linse durch eine Brille vor das Auge gebracht werden kann. Danach folgt der Lückentext, der inhaltlich gleich bleibt. Jedoch wird auf die Zeichnung verzichtet, in der eine zusätzliche Linse in den Strahlengang gebracht wird. Da die Schüler im dritten Kapitel nun nicht mehr mit der Zeichnung der umfassenden ersten Teilstrahlung bei der Abbildung eines gesamten Gegenstandes auf der Netzhaut in Berührung kommen, muss auch hier die Zeichnung entfernt werden.

5.4 Hauptstudie – Teil II

Der zweite Teil der Hauptstudie wird mit 8 Schülerinnen und 5 Schülern und somit wieder insgesamt 13 Probanden durchgeführt. Die Probanden sind in einem Alter von 11 bis 13 Jahren, wobei der Hauptteil 12 Jahre alt ist ($\varphi = 3$, $\sigma = 4$). 4 Probanden sind in einem Alter von 13 Jahren ($\varphi = 3$, $\sigma = 1$) und 2 Schülerinnen sind 11 Jahre alt. Damit liegt das Durchschnittsalter bei $\emptyset = 12,15$ Jahren. 8 Probanden ($\varphi = 5$, $\sigma = 3$) befinden sich in der 6., 3 Probanden ($\varphi = 2$, $\sigma = 1$) in der 7. und 2 Probanden ($\varphi = 1$, $\sigma = 1$) in der 5. gymnasialen Klassenstufe. Auch die Probanden für den zweiten Teil der Hauptstudie besuchen unterschiedliche Gymnasien.

Die Stichproben der ersten beiden Teile der Hauptstudie sind somit miteinander vergleichbar und stimmen in Hinblick auf Anzahl, Durchschnittsalter und Klassenstufen überein. Lediglich die Geschlechterverteilung variiert leicht zwischen beiden Studienabschnitten zu Gunsten der Probandinnen.

5.4.1 Anpassung des Wissenstests

Da die Lernmaterialien aufgrund der Ergebnisse aus dem ersten Teil der Hauptstudie überarbeitet wurden, muss auch der Wissenstest als Erhebungsinstrument angepasst werden. Dabei handelt es sich um eine inhaltliche Anpassung an die Aufgaben aus den Lernmaterialien. Insbesondere die Aufgaben, die das Wissen aus dem dritten und vierten Kapitel abfragen, gilt es zu überarbeiten.⁶⁹

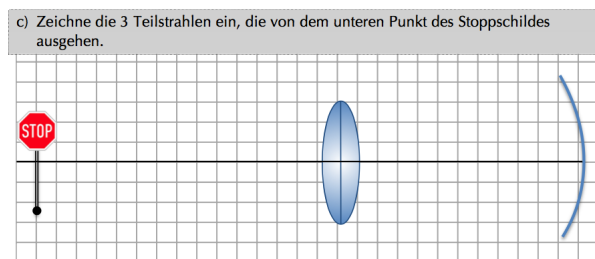
Die erste Aufgabe, in der die Probanden den Querschnitt des Auges beschriften sollen, bleibt bestehen. Die beiden Aufgabenteile, in denen die Schüler einerseits die Linse als den für das umgekehrte Bild auf der Netzhaut verantwortlichen Bestandteil des menschlichen Auges herausstellen sollen und andererseits erklären sollen, warum die Umwelt nicht verkehrt herum wahrgenommen wird, werden aus dem Test herausgenommen. Diese Inhalte werden auch im dritten Kapitel der Lernmaterialien nicht mehr thematisiert, sodass diese Aufgaben auch im Wissenstest nicht mehr aufgeführt werden.

Die zweite Aufgabe, in der die Schüler den Weg des Lichts von der Straßenlaterne zum Stoppschild und von da aus zum Protagonisten der Geschichte einzeichnen sollen, bleibt ebenfalls bestehen.

Danach folgt die dritte Aufgabe, in der die Schüler die drei Teilstrahlen vom obersten Punkt des Stoppschildes aus konstruieren und im zweiten Aufgabenteil die Brennpunkte einzeichnen und beschriften sollen. Auch an dieser Aufgabe werden keine Änderungen vorgenommen. Es wird jedoch ein neuer dritter Aufgabenteil der dritten Aufgabe formuliert: Die Schüler sollen in der

nebenstehenden Aufgabe die drei Teilstrahlen vom untersten Teil des Stoppschildes ausgehend konstruieren. Damit wird überprüft, ob die Schüler verstanden haben, dass

sich die Teilstrahlen an der optischen Achse spiegeln – im Vergleich zum obersten Punkt des Stoppschildes als Ausgangspunkt. Da im dritten Kapitel die Konstruktion der Teilstrahlen im Fokus steht, soll diese auch im Wissenstest einen höheren Stellenwert einnehmen. Als vierter Aufga-



⁶⁹ Der angepasste Wissenstest befindet sich im Anhang auf Seite 250.

benteil der dritten Aufgabe bleibt die Multiple-Choice-Aufgabe bestehen, in der die Schüler festhalten sollen, dass nur dann ein scharfes Abbild auf der Netzhaut entstehen kann, wenn sich hier die drei Teilstrahlen treffen. Hinzu kommt ein fünfter und letzter Aufgabenteil: *Personen mit einem zu langen oder zu kurzen Augapfel können nicht scharf sehen. Erkläre, warum kein scharfes Bild auf der Netzhaut entsteht.* Mit dieser Aufgabe wird das Verstehen der Inhalte aus dem vierten Kapitel überprüft. Es wird getestet, ob die Schüler verstanden haben, dass sich die drei Teilstrahlen an einem Punkt auf der Netzhaut treffen müssen, damit ein scharfes Bild entsteht und dies in Abhängigkeit zum Abstand von Netzhaut und Linse steht.

Die vierte und letzte Aufgabe des Wissenstests, die aus dem Lückentext besteht und die zur Überprüfung der Transferleistung der Schüler dient, bleibt ebenfalls bestehen.

5.4.2 Anpassung des Interviewleitfadens

Der Interviewleitfaden wird nur geringfügig angepasst.⁷⁰ Dabei steht besonders das dritte Kapitel im Vordergrund. Die Fragen, die neu formuliert werden, sollen jedoch nur dann zum Einsatz kommen, wenn die Probanden nicht von selbst über die Abschnitte der Lernmaterialien sprechen. Angepasst wird zum einen die zweite Frage, in der nach der Verständlichkeit gefragt wird. Es wird folgende zusätzliche Unterfrage in den Leitfaden aufgenommen:

→ *Wie findest du die Erklärung zu den drei Teilstrahlen im grünen Kasten?*

Auch zur vierten Frage, die auf die Schwierigkeit der Aufgaben abzielt, werden zusätzliche Unterfragen formuliert, die sich auf das Zeichnen der drei Teilstrahlen im dritten Kapitel beziehen:

→ *Hat dir der Tipp, dass du mit dem zweiten Teilstrahl beginnen sollst, geholfen?*

→ *Hat dir der Tipp, dass der dritte Teilstrahl von der Netzhaut ausgehend gezeichnet werde soll, geholfen?*

→ *Hat dir der Tipp, dass die Teilstrahlen gespiegelt sind, geholfen?*

⁷⁰ Der angepasste Interviewleitfaden befindet sich im Anhang auf Seite 251.

Mit den angepassten Erhebungsinstrumenten wird der zweite Teil der Hauptstudie durchgeführt. Für die Auswertung wird zudem das Codesystem mit den Kürzeln für die Lernmaterialien angepasst.⁷¹

5.4.3 Beschreibung der Ergebnisse

In der folgenden Abbildung 5.8 ist die absolute Häufigkeit der Probanden dargestellt, denen beim Bearbeiten der Aufgaben in den Lernmaterialien Fehler unterlaufen (falsch) und die Aufgaben auslassen (fehlt). Dargestellt ist zudem, welche Aufgaben von den Probanden innerhalb der Interviews als schwierig empfunden werden. Zudem sind in Abbildung 5.9 die von den Probanden begangenen Fehler im Wissenstest dargestellt, wobei wieder die absolute Häufigkeit der Probanden über die einzelnen Aufgaben aufgetragen ist. Zudem ist in Tabelle 5.7 dargestellt, welche Passagen der Lernmaterialien, neben den Aufgaben, von den Probanden als schwierig empfunden werden.

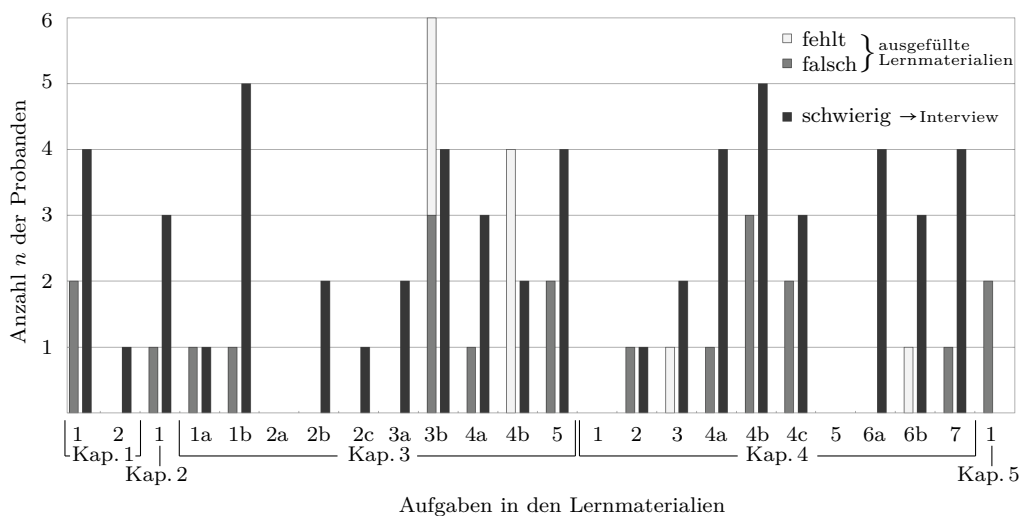


Abbildung 5.8: Hauptstudie Teil II – Anzahl der aufgetretenen Fehler und Erschwernisse innerhalb der einzelnen Aufgaben beim Bearbeiten der Lernmaterialien.

Auf den ersten Blick scheint die Gesamtzahl der Fehler und das Auslassen von Aufgaben deutlich gesunken zu sein.⁷² Auch im zweiten Teil der Hauptstudie werden in jedem Kapitel Fehler begangen, Aufgaben ausgelassen und Schwierigkeiten geäußert. Zunächst wird der Fokus jedoch auf

⁷¹ Eine Auflistung und Beschreibung der Kürzel für die dritte Version der Lernmaterialien befindet sich im Anhang auf Seite 249.

⁷² Ein Vergleich beider Lernmaterialversionen und die damit verbundene Frage, ob es sich bei der Anpassung der Lernmaterialien um eine Verbesserung dieser handelt, findet nach der detaillierten Fehlerbeschreibung statt.

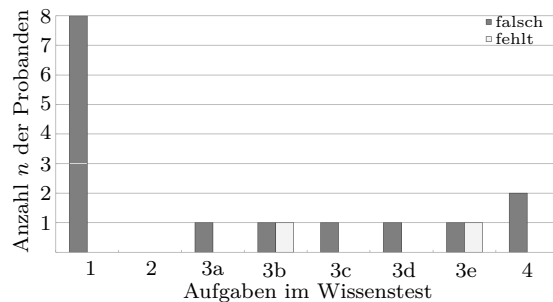


Abbildung 5.9: Hauptstudie Teil II – Anzahl der aufgetretenen Fehler innerhalb der einzelnen Aufgaben beim Bearbeiten des Wissenstests.

Tabelle 5.7: Hauptstudie Teil II – Weitere Erschwernisse in den Lernmaterialien.

Kürzel	Kurzbeschreibung	Anzahl
1T1	Tim vor dem Spiegel	1
1I2	Aufbau inneres Auge	1
3I2	Lichtstrahl = 3 Teilstrahlen	1
4T1	Tim beim Augenarzt	2
5I1	Linsenformen (gesamter Kasten)	2

die Aufgaben gelegt, die von allen Probanden korrekt gelöst werden: In der zweiten Aufgabe im ersten Kapitel (1A2), in der die Probanden die Begriffe Iris, Pupille und Lederhaut in die Abbildung des äußeren Auges eintragen sollen, werden keine Fehler gemacht. Ein Proband stuft diese Aufgabe als schwierig ein, weil er zunächst die Begriffe Iris und Lederhaut vertauscht (vgl. Interview IV zu Kap. 1-3 #00:03:40-5# - #00:04:33-9#). Gleiches lässt sich in der zweiten Aufgabe des dritten Kapitels (3A2) feststellen, in der die Probanden in drei Teilaufgaben an die Konstruktion der drei Teilstrahlen herangeführt werden und die komplett neu entstanden ist. Zu den letzten beiden Teilaufgaben (2b, 2c) äußern zwei Probanden Schwierigkeiten beziehungsweise Verbesserungsvorschläge. Ein Proband sagt, dass er bei beiden Teilaufgaben verwirrt war, weil der Brennpunkt bereits auf der optischen Achse eingezeichnet ist (vgl. Interview IV zu Kap. 1-3 #00:03:55-4# - #00:04:22-5#). Der zweite Proband begründet seine Verständnisprobleme nicht (vgl. Interview X zu Kap. 1-3 #00:02:41-7# - #00:03:06-5#). Die danach folgende Aufgabe (3A3a), in der die Schüler die drei Teilstrahlen vom obersten Punkt des Gegenstandes ausgehend konstruieren sollen, wird ebenfalls korrekt gelöst, wobei ein Proband sowohl für diese Aufgabe als auch für die nachfolgenden Aufgaben zur Kon-

struktion der Teilstrahlen in die Lösungen schaut (vgl. Interview VI zu Kap. 1-3 #00:16:00-7# - #00:16:38-6#). Ein weiterer Proband empfindet es schwierig, dass sich alle Teilstrahlen auf der Netzhaut in einem Punkt treffen sollen (vgl. Interview VII zu Kap. 1-3 #00:04:00-7# - #00:04:21-8#). Alle Probanden ordnen das Ergebnis des Sehtests in der ersten Aufgabe des vierten Kapitels (4A1) korrekt zu. Zudem erkennen die Schüler alle korrekterweise in der fünften Aufgabe des vierten Kapitels (4A5), dass es sich um eine Kurzsichtigkeit bei dem Protagonisten handelt. Zu diesen beiden Aufgaben äußert kein Proband Schwierigkeiten. Außerdem konstruieren alle Schüler die drei Teilstrahlen in dem ersten Teil der sechsten Aufgabe im vierten Kapitel (4A6a) ohne Fehler. Allerdings empfinden vier Probanden diese Aufgabe als schwierig, wobei ein Proband aufgrund dessen, wie bereits im dritten Kapitel, in die Lösungen schaut (vgl. Interview VI zu Kap. 4 & 5 #00:07:55-3# - #00:08:07-5#). Einem weiteren Probanden ist unklar, ob die Teilstrahlen zweimal gezeichnet werden sollen (vgl. Interview V zu Kap. 4 & 5 #00:08:03-4# - #00:08:18-4#) und einem anderen Probanden fällt das Konstruieren schwer, er kann dies aber nicht begründen und löst, wie die anderen Probanden auch, die Aufgabe korrekt (vgl. Interview X zu Kap. 4 & 5 #00:01:08-2# - #00:01:18-4#; #00:02:41-4# - #00:02:43-0#). Im Wissenstest zeichnen alle Probanden in der zweiten Aufgabe (Test A2) den Weg des Lichts von der Straßenlaterne zum Stoppschild und von da aus zum Protagonisten korrekt ein.⁷³

Zudem gibt es zahlreiche Aufgaben, die von nur einem Probanden falsch gelöst oder ausgelassen werden. Von nur einem Probanden ausgelassen wird einerseits die dritte Aufgabe im vierten Kapitel (4A3), in welcher der Treffpunkt der Teilstrahlen auf der Netzhaut markiert werden soll und andererseits der zweite Teil der sechsten Aufgabe im vierten Kapitel (4A6b), in der die Brennpunkte eingezeichnet werden sollen. Ein Proband gibt an, dass er beim Markieren des Treffpunkts der drei Teilstrahlen (4A3) in die Lösungen schaut (vgl. Interview I zu Kap. 4 & 5 #00:03:32-9# - #00:04:14-1#). Beim Einzeichnen der Brennpunkte (4A6b) orientiert sich ein Proband an den Lösungen, wobei es sich um den Probanden handelt, der bei der gesamten Aufgabe in die Lösungen schaut (vgl. Interview VI zu Kap. 4 & 5 #00:02:33-7# - #00:03:10-8#). Ein weiterer Proband hat bis dahin noch nicht verstanden, was ein Brennpunkt ist und wünscht sich

⁷³ Auf die korrekt gelösten Aufgaben wird beim Vergleich beider Lernmaterialversionen näher eingegangen.

hierzu mehr Informationen (vgl. Interview XIII zu Kap. 4 & 5 #00:04:59-1# - #00:05:15-0#). Sieben weitere Aufgaben werden jeweils von nur einem Probanden fehlerhaft gelöst. Dabei handelt es sich um die Aufgabe im zweiten Kapitel (2A1), in welcher der Weg des Lichts, von der Taschenlampe ausgehend, gezeichnet werden soll. Zu dieser Aufgabe gilt es zudem zu erwähnen, dass zehn der Probanden den Weg des Lichts in Form von Pfeilen darstellen und drei Probanden Linien ohne Pfeilspitzen zeichnen. Zu dieser Aufgabe geben zwei Probanden an, in die Lösungen geschaut zu haben, wobei ein Proband diesen Schritt damit begründet, dass die Tür angewinkelt ist (vgl. Interview IV zu Kap. 1-3 #00:07:12-3# - #00:07:21-7#). Außerdem werden beide Teile der ersten Aufgabe im dritten Kapitel (3A1a, b) jeweils von einem Probanden falsch gelöst, in der ebenfalls der Weg des Lichts gezeichnet werden soll sowie die Linse und die Netzhaut beschriftet werden sollen. An dieser Stelle ist allerdings auf eine Auffälligkeit hinzuweisen. Die für die Beschriftung dieser beiden Bestandteile des Auges gedachten gestrichelten Linien werden von nur fünf Probanden genutzt. Acht Probanden und damit 61,5% nutzen die Linien nicht, sondern schreiben die Begriffe direkt an den Querschnitt des Auges. Diese Teilaufgabe wird außerdem von fünf Probanden als schwierig eingestuft, wobei drei Probanden angeben, dass sie durch das Vorhandensein der gestrichelten Linien verwirrt sind (vgl. z. B. Interview V zu Kap. 1-3 #00:00:58-5# - #00:01:43-5#). Im dritten Kapitel werden die Teilstrahlen vom untersten Punkt des Baumes ausgehend in dem ersten Teil der vierten Aufgabe (3A4a) von einem Probanden fehlerhaft gezeichnet und drei Probanden stufen diese Teilaufgabe als schwierig ein. Ein Proband gibt wieder an, dass er zum Lösen in die Aufgaben schaut (vgl. Interview VI zu Kap. 1-3 #00:16:00-7# - #00:16:38-6#) und ein weiterer Proband empfindet den veränderten Ausgangspunkt der Teilstrahlen als schwierig (vgl. Interview IX zu Kap. 1-3 #00:00:31-8# - #00:01:08-8#). Ein Proband trifft eine fehlerhafte Zuordnung in der zweiten Aufgabe im vierten Kapitel (4A2), in der die Schüler erkennen sollen, dass bei einem zu langen Augapfel der Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut zu groß ist. Dieser Proband begründet seinen Fehler damit, dass es unverständlich sei, welcher Abstand gemeint ist (vgl. Interview IX zu Kap. 4 & 5 #00:01:23-0# - #00:01:56-5#). In dem ersten Teil der vierten Aufgabe (4A4a), in dem die Position der Netzhaut zeichnerisch verändert werden soll, zeichnet ein Proband beide Netzhäute rechts neben die bereits vorhandene

und löst damit diese Aufgabe fehlerhaft. Diese Teilaufgabe wird von vier Probanden als schwierig eingeschätzt, wobei einer zugibt, in die Lösungen geschaut zu haben (vgl. Interview VIII zu Kap. 4 & 5 #00:01:52-1# - #00:02:54-7#). Ein weiterer Proband gibt an, diese Aufgabe übersehen zu haben (vgl. Interview IV zu Kap. 4 & 5 #00:01:39-6# - #00:02:38-4#). Da jedoch keiner der Probanden diese Aufgabe ausgelassen hat, hat der soeben beschriebene Proband beide Netzhäute im Nachhinein eingezeichnet. Einem anderen Probanden bleibt beim Bearbeiten der Aufgabe unklar, wie die verschobenen Netzhäute beschriftet werden sollen (vgl. Interview V zu Kap. 4 & 5 #00:08:35-4# - #00:08:58-7#). Ein Proband erkennt in der siebten Aufgabe des vierten Kapitels (4A7) nicht, dass sich die Brennpunkte verschieben, wenn sich der Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut ändert und sich dennoch die Teilstrahlen in einem Punkt auf der Netzhaut treffen sollen. Vier Probanden äußern Verständnisschwierigkeiten zu dieser Aufgabe und ein Schüler begründet diese damit, dass sich die beiden Zeichnungen zu ähnlich sind (vgl. Interview IX zu Kap. 4 & 5 #00:02:30-3# - #00:02:52-4#). Ein weiterer Proband hat bereits beim Einzeichnen der Brennpunkte (4A6b) Schwierigkeiten, da ihm bis dahin noch unklar ist, was ein Brennpunkt ist. Hier ergibt sich auch die Erschwernis beim Lösen dieser Aufgabe (vgl. Interview XIII zu Kap. 4 & 5 #00:04:47-1# - #00:05:15-0#). Im Wissenstest werden die Teile der dritten Aufgabe (Test A3) von je einem Probanden fehlerhaft gelöst. In dieser Aufgabe sollen die Schüler zunächst die drei Teilstrahlen vom obersten Punkt des Stoppschildes konstruieren (A3a) und hier die Brennpunkte einzeichnen und beschriften (A3b). Das Einzeichnen der Brennpunkte und das Beschriften dieser wird von einem zusätzlichen Probanden ausgelassen. Dabei fällt auf, dass acht Probanden die Brennpunkte zwar korrekt einzeichnen, diese aber nicht beschriften.⁷⁴ In dem dritten Teil der Aufgabe (A3c) sollen die Schüler die Teilstrahlen vom untersten Punkt des Stoppschildes aus konstruieren, wobei dies wieder von einem Probanden fehlerhaft gelöst wird. Die darauf folgende Multiple-Choice-Aufgabe (A3d), in der herausgestellt werden soll, dass sich die Teilstrahlen in einem Punkt auf der Netzhaut treffen müssen, damit ein scharfes Bild entsteht, wird wieder von einem Probanden falsch gelöst. In dem letzten Aufgabenteil der dritten Aufgabe (A3e) beschreibt ein Proband fehler-

⁷⁴ Die Lösungen dieser acht Probanden werden als korrekt gewertet, da es vielmehr um die Position der Brennpunkte geht als um deren Beschriftung.

haft, warum kein scharfes Bild entsteht, wenn Personen einen zu langen oder zu kurzen Augapfel haben. Dieser Aufgabenteil wird zusätzlich von einem Probanden komplett ausgelassen.

Die soeben beschriebenen Aufgaben, die entweder von allen Probanden korrekt oder jeweils nur von einem Probanden fehlerhaft gelöst oder von einem Probanden ausgelassen werden, rücken aufgrund der geringen Fehlerquote für eine erneute mögliche Verbesserung der Lernmaterialien in den Hintergrund. Auch die genannten Schwierigkeiten stellen für die Schüler keine unüberwindbaren Hindernisse für das Lösen der Aufgaben dar.⁷⁵ Das Hauptaugenmerk wird auf die Aufgaben gelegt, in denen mehrere Probanden Fehler begehen. Die höchste Fehlerquote zeichnet sich durch das Aufsummieren der Fehler und das Auslassen des zweiten Teils der dritten Aufgabe im dritten Kapitel aus (3A3b). Sie liegt mit sechs Probanden bei 46,2%, wovon drei Probanden die Aufgabe falsch lösen und drei Probanden diese auslassen. Es handelt sich dabei um das Beschriften der Brennpunkte, nachdem die Teilstrahlen vom obersten Punkt des Gegenstandes vervollständigt wurden. Für das Beschriften der Brennpunkte sind gestrichelte Linien vorhanden. Den Probanden, die die Aufgabe fehlerhaft lösen oder auslassen, ist dies nicht bewusst. Zwei Probanden geben in den Interviews an, dass sie die Funktion der gestrichelten Linien nicht verstehen (vgl. z. B. Interview VIII zu Kap. 1-3 #00:03:53-9# - #00:03:59-0#). Die fehlerhaften Lösungen der drei Probanden deuten auf ein Übersehen der Aufgabenstellung hin. Die Probanden tragen auf die dafür vorgesehenen Linien die

falschen Begriffe ein: Der erste Proband trägt die Begriffe Linse und Netzhaut ein, der zweite die Begriffe optische Achse und Netzhaut und der dritte – wie in nebenstehender Abbildung 5.10 zu sehen – verwendet die Begriffe 3. Teilstrahl und 2. Teilstrahl. Die fehlerhaf-

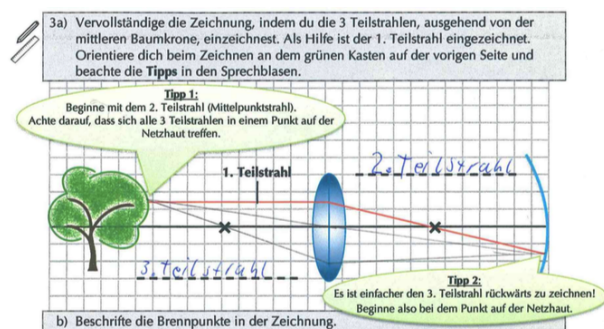


Abbildung 5.10: Hauptstudie Teil II – Fehler eines Probanden beim Beschriften der Brennpunkte in Kapitel 3.

⁷⁵ Ein Proband gibt bei allen Aufgaben, die sich mit der Konstruktion der drei Teilstrahlen beschäftigen, an, in die Lösungen geschaut zu haben. Dieser Schüler kann jedoch keine konkreten Schwierigkeiten nennen, die sein Vorgehen begründen.

ten Antworten lassen darauf schließen, dass diese drei Probanden zwar die gestrichelten Linien wahrnehmen, jedoch nicht die darunter stehende Aufgabe. Das Übersehen der Aufgabe könnte dadurch begünstigt werden, dass die Sprechblase, die den zweiten Tipp enthält, den grauen Kasten mit der Aufgabenstellung teilweise überdeckt. Die Position der Aufgabenstellung kann ebenfalls dazu beitragen, dass diese übersehen wird. Dass die Aufgaben teilweise nicht gesehen werden und in den Materialien nicht genügend präsent sind, wird von einem Probanden bemängelt (vgl. Interview III zu Kap. 4 & 5 #00:00:53-2# - #00:01:17-3#). Gleiches spiegelt sich durch das häufige Auslassen des zweiten Aufgabenteils der darunter stehenden vierten Aufgabe des dritten Kapitels (3A4b) wider. Diese Aufgabe, in der die Schüler den Punkt auf der Netzhaut markieren sollen, nachdem sie die drei Teilstrahlen vom untersten Punkt des Baumes aus konstruiert haben, wird von vier Probanden und damit 30,8% ausgelassen. Diese Teilaufgabe ist insofern vergleichbar mit der, in der die Brennpunkte beschriftet werden sollen, weil beide in demselben Format gestaltet sind. Demnach befindet sich diese Teilaufgabe ebenfalls unter dem Zeichenbereich. Jedoch wird sie nicht von einem in einer Sprechblase befindlichen Tipp verdeckt. Ein Proband, der die Aufgabe auslässt, gibt im Interview an, diesen Aufgabenteil übersehen zu haben und empfindet die Seite als unübersichtlich (vgl. Interview III zu Kap. 1-3 #00:06:34-7# - #00:06:44-0#). Der bereits erwähnte zweite Teil der dritten Aufgabe im Wissenstest (Test A3b) unterstützt die Vermutung, dass diese Aufgabenteile aufgrund ihrer Position übersehen werden. Im Wissenstest wird dieser Aufgabenteil von einem Probanden falsch gelöst und von einem weiteren Probanden ausgelassen. Wie bereits angeführt zeichnen acht Probanden die Brennpunkte zwar ein, beschriften diese aber nicht. Es wäre möglich, dass diese acht Probanden die Brennpunkte automatisiert einzeichnen und durch das Übersehen der darunter stehenden Aufgabe nicht beschriften.

Das dritte Kapitel legt den Schwerpunkt auf den Verlauf und die Konstruktion der drei Teilstrahlen beim Abbild eines Gegenstandspunktes durch eine Sammellinse. Generell scheinen die Probanden wenig Schwierigkeiten mit dem Zeichnen der drei Teilstrahlen zu haben, da weder die entsprechenden Aufgaben eine hohe Fehlerquote aufweisen noch die Probanden das Konstruieren als so schwierig einstufen, dass es nicht lösbar ist. Jedoch wird die fünfte Aufgabe des dritten Kapitels (3A5) von zwei Probanden falsch gelöst und von einem Probanden ausgelassen.

Beide Probanden begehen denselben Fehler, indem sie versuchen, die Teilstrahlen für den Spezialfall zu konstruieren, dass der Ausgangspunkt auf der optischen Achse liegt. In diesem Fall müssten alle drei Teilstrahlen auf der

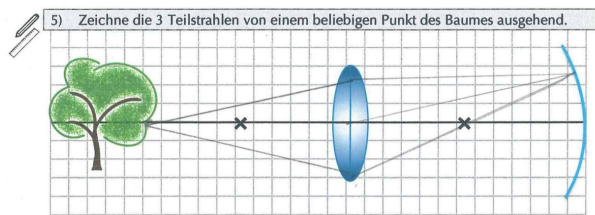


Abbildung 5.11: Hauptstudie Teil II – Fehler eines Probanden beim Konstruieren der Teilstrahlen von einem beliebigen Punkt ausgehend in Kapitel 3.

optischen Achse entlang verlaufen. Diese Aufgabe wird zudem von vier Probanden als schwierig eingestuft und die Probanden sagen, sie verstehen die Aufgabe nicht (vgl. z. B. Interview X zu Kapitel 1-3 #00:03:19-6# - #00:03:33-2#).

Die beiden letzten Teile der vierten Aufgabe im vierten Kapitel (4A4c) und die Aufgabe im fünften Kapitel (5A1) werden von zwei Probanden beziehungsweise von drei Probanden (4A4b) fehlerhaft gelöst. Die gemachten Fehler stehen in Verbindung zueinander. Diejenigen Probanden, die in der vierten Aufgabe des vierten Kapitels die Lücken falsch ausfüllen und/oder eine falsche Zuordnung der Position der Netzhaut treffen, begehen auch dieselben Fehler in dem Lückentext des fünften Kapitels. Fünf Probanden schätzen den zweiten Teil der vierten Aufgabe im vierten Kapitel (4A4b) als schwierig ein und zwei Probanden begründen diese Schwierigkeit damit, dass ihnen unklar ist, auf welche Netzhaut sich die Fragen/ Lücken beziehen (vgl. z. B. Interview II zu Kap. 4 & 5 #00:02:07-2# - #00:02:39-4#). Der dritte Aufgabenteil (4A4c) wird von drei Probanden als schwierig eingestuft, wovon ein Proband dieselbe Begründung anführt wie zuvor (vgl. Interview IX zu Kap. 4 & 5 #00:03:25-4# - #00:03:41-6#).

In der ersten Aufgabe des ersten Kapitels (1A1) werden die Schüler dazu aufgefordert, eine Vermutung zu äußern, warum die Lehrerin den Rat ausspricht, zum Augenarzt zu gehen. Zwei Probanden lösen diese Aufgabe falsch, da sich ihre Vermutung nicht auf die Geschichte bezieht. Der erste Proband vermutet, der Protagonist würde von der Sonne geblendet werden und der zweite Proband zweifelt das allgemeine Wohlbefinden des Protagonisten an. Zudem schätzen vier Probanden diese Aufgabe als schwierig ein. Ein Proband sagt, es ist unklar, worauf sich die Vermutung bezieht (vgl. Interview IV zu Kap. 1-3 #00:06:45-1# - #00:06:57-6#) und derselbe Proband empfindet die Geschichte (1T1), die sich über der

Aufgabe befindet, als unverständlich (vgl. ebd. #00:00:59-4# - #00:01:07-4#). In Zusammenhang mit den Inhalten aus dem ersten Kapitel der Lernmaterialien steht die erste Aufgabe des Wissenstests (Test A1), deren Fehlerquote mit acht Probanden (61,5%) besonders im Vergleich zu den Fehlerquoten der restlichen Aufgaben hoch erscheint. Es muss allerdings erwähnt werden, dass fünf der acht Probanden die Begriffe Linse und Netzhaut korrekt eintragen und nur bei der Beschriftung der restlichen Bestandteile Fehler machen. Daraus lässt sich ableiten, dass diese beiden Begriffe und deren Position im Querschnitt des menschlichen Auges besser von den Schülern behalten werden. Begründet werden kann dies mit der stetigen Wiederholung dieser Begriffe in den Lernmaterialien.

Bei den Aufgaben, in denen die drei Teilstrahlen konstruiert werden sollen – sowohl in den Lernmaterialien als auch im Wissenstest – fällt auf, dass acht Probanden und damit 61,5% die Teilstrahlen sehr unsauber zeichnen. Alle Probanden verwenden bei den Aufgaben, die zeichnerisch gelöst werden sollen, Lineale, sodass die Ursache für die Unsauberkeit nicht in einem Nichtbenutzen eines Lineals begründet liegen kann. Stattdessen wird deutlich,

dass diese acht Probanden den Teil des ersten Teilstrahls vor der Linse und den Teil des dritten Teilstrahls hinter der Linse nicht parallel zur optischen Achse zeichnen. Die Teilstrahlen treffen sich

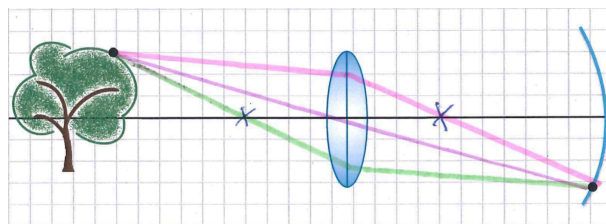


Abbildung 5.12: Hauptstudie Teil II – Konstruktion der drei Teilstrahlen ohne die Parallelität zur optischen Achse zu beachten in Kapitel 4.

nicht sauber in einem Punkt auf der Netzhaut, wenn keine Parallelität der Abschnitte des ersten und dritten Teilstrahls zur optischen Achse gegeben ist. Zwei Probanden geben im Interview an, dass ihnen nicht bewusst ist, dass die genannten Abschnitte der Teilstrahlen parallel zur optischen Achse verlaufen (vgl. z. B. Interview IX zu Kap. 4 & 5 #00:05:08-8# - #00:05:36-7#).

5.4.4 Reliabilitätstest

Auch für den zweiten Teil der Hauptstudie wird ein Reliabilitätstest nach Cohen für die Auswertung der Lernmaterialien, des Wissenstests und der Interviews durchgeführt. Wieder wird der gesamte Datensatz einer

Intercoder-Reliabilitätsprüfung unterzogen. Es wird äquivalent zum Reliabilitätstest im ersten Teil der Hauptstudie vorgegangen.⁷⁶ Für die Auswertung der Aufgaben in den Lernmaterialien und des Wissenstests kann aufgrund der hohen Anzahl an geschlossenen und halboffenen Aufgaben von einer erneuten hohen Reliabilität ausgegangen werden. Für die Aufgaben in den Lernmaterialien ergibt sich folgende Kreuztabelle:

Tabelle 5.8: Hauptstudie Teil II – Kreuztabelle für die Beobachtungen beider Codierer in den Aufgaben der Lernmaterialien.

		Codierer 1			Σ
		korrekt	falsch	fehlt	
Codierer 2	korrekt	275	0	1	276
	falsch	7	20	0	27
	fehlt	0	1	8	9
	Σ	282	21	9	312

Mit $p_{\ddot{u}} = 0,971$ und $p_e = 0,806$ ergibt sich mit Gleichung (5.1) für den Reliabilitätskoeffizienten $\kappa = \mathbf{0,851}$, sodass von einer sehr guten Reliabilität gesprochen werden kann. Für den Wissenstest ergibt sich folgende Kreuztabelle:

Tabelle 5.9: Hauptstudie Teil II – Kreuztabelle für die Beobachtungen beider Codierer im Wissenstest.

		Codierer 1			Σ
		korrekt	falsch	fehlt	
Codierer 2	korrekt	82	0	0	82
	falsch	5	15	0	20
	fehlt	0	0	2	2
	Σ	87	15	2	104

Mit $p_{\ddot{u}} = 0,952$ und $p_e = 0,688$ ergibt sich mit Gleichung (5.1) für den Reliabilitätskoeffizienten $\kappa = \mathbf{0,846}$, womit es sich auch hier erneut um eine sehr gute Reliabilität handelt.

Für den Intercoder-Reliabilitätstest zu der quantitativen Inhaltsanalyse der Interviews lässt sich die Kreuztabelle 5.10 erstellen. Mit $p_{\ddot{u}} = 0,945$ und $p_e = 0,817$ ergibt sich mit Gleichung (5.1) für den Reliabilitätskoeffizienten $\kappa = \mathbf{0,699}$. Damit handelt es sich um eine gute Reliabilität.

⁷⁶ Die Auswertung beider Codierer befindet sich in tabellarischer Form im Anhang auf Seite 252ff.

Tabelle 5.10: Hauptstudie Teil II – Kreuztabelle für die Beobachtungen beider Codierer bei der Analyse der Interviews.

		Codierer 1		
		kann bestehen bleiben	muss verbessert werden	Σ
Codierer 2	kann bestehen bleiben	600	21	621
	muss verbessert werden	17	51	68
	Σ	617	72	689

5.4.5 Vergleich beider Lernmaterialversionen

Um eine Aussage darüber treffen zu können, ob es sich bei der zweiten Anpassung der Lernmaterialien tatsächlich um eine Verbesserung dieser handelt, müssen beide Versionen hinsichtlich der gemachten Fehler miteinander verglichen werden. Ein Vergleich der Häufigkeiten der aufgetretenen Schwierigkeiten in den Interviews findet hier nicht statt. Die Interviews dienen dazu, Gründe für die Fehler und das Auslassen der Aufgaben zu finden. Durch das Auftreten der Fehler zeigt sich, ob es sich bei der subjektiv empfundenen Schwierigkeit um ein umkehrbares Hindernis handelt oder ob diese zu einer unüberbrückbaren Erschwernis führt. Außerdem kann eine erhöhte Anstrengung seitens der Schüler ebenfalls als Schwierigkeit empfunden werden, da diese mit einem Anstieg der lernrelevanten kognitiven Belastung verbunden ist. Ein Vergleich der Ergebnisse der Interviews bezogen auf die Häufigkeiten gibt demnach wenig Aufschluss darüber, ob es sich um eine Verbesserung der Lernmaterialien handelt.

Es wird deutlich, dass sich die Gesamtzahl der begangenen Fehler und der ausgelassenen Aufgaben im Vergleich zum ersten Teil der Hauptstudie deutlich verringert. Um einen statistischen Vergleich zwischen beiden Teilen zu erlangen, wird zunächst die Zahl der Fehler sowie die der fehlenden und der korrekt gelösten Aufgaben aufsummiert. Da es sich bei diesen beiden Teilen der Hauptstudie um dieselbe Probandenzahl handelt, können die Summen als ein Maß des Vergleichs herangezogen werden. Jedoch können nur die Aufgaben miteinander verglichen werden, die in beiden Lernmaterialversionen vorhanden sind. In dem ersten Teil der Hauptstudie werden 22 Aufgabenteile ausgewertet und im zweiten Teil 24 Aufgabenteile. Vergleichbar sind 17 Aufgabenteile, da diese sowohl in den Lernmaterialien des ersten Teils als auch in denen des zweiten Teils

der Hauptstudie vorhanden sind. Die 17 vergleichbaren Aufgaben sind in den beiden Teilen der Hauptstudie mit unterschiedlichen Kürzeln versehen. In folgender Tabelle 5.11 sind die vergleichbaren Aufgaben in beiden Lernmaterialversionen aufgelistet und gegenübergestellt. Zudem ist der Arbeitsauftrag der Aufgabe kurz beschrieben.

Tabelle 5.11: Vergleichbare Aufgaben in den beiden Lernmaterialversionen.

Teil I	Teil II	Kurzbeschreibung
1A1	1A1	Vermutung aufstellen
1A2	1A2	Äußeres Auge beschriften
2A1	2A1	Weg des Lichts zeichnen (Taschenlampe)
3A1a	3A1a	Weg des Lichts zeichnen (Sonne)
3A1b	3A1b	Linse und Netzhaut beschriften
3A3a	3A4a	Teilstrahlen zeichnen (unterster Punkt)
3A3b	3A3b	Brennpunkte beschriften
4A1	4A1	Ergebnis Sehtest: Ferne
4A2a	4A3	Punkt auf Netzhaut markieren
4A2b	4A4a	Beide Netzhäute zeichnen
4A2c	4A4b	Lücken ausfüllen
4A3	4A4c	b als Position der Netzhaut erkennen
4A4	4A5	Fehlsichtigkeit erkennen: kurzsichtig
4A5a	4A6a	3 Teilstrahlen zeichnen (2x)
4A5b	4A6b	Brennpunkte einzeichnen
4A6	4A7	Erkennen, dass sich Brennpunkte verschieben
5A1	5A1	Lückentext

Abbildung 5.13 zeigt die Anzahl der Fehler und der ausgelassenen Aufgaben innerhalb der 17 vergleichbaren Aufgaben im ersten und im zweiten Teil der Hauptstudie.

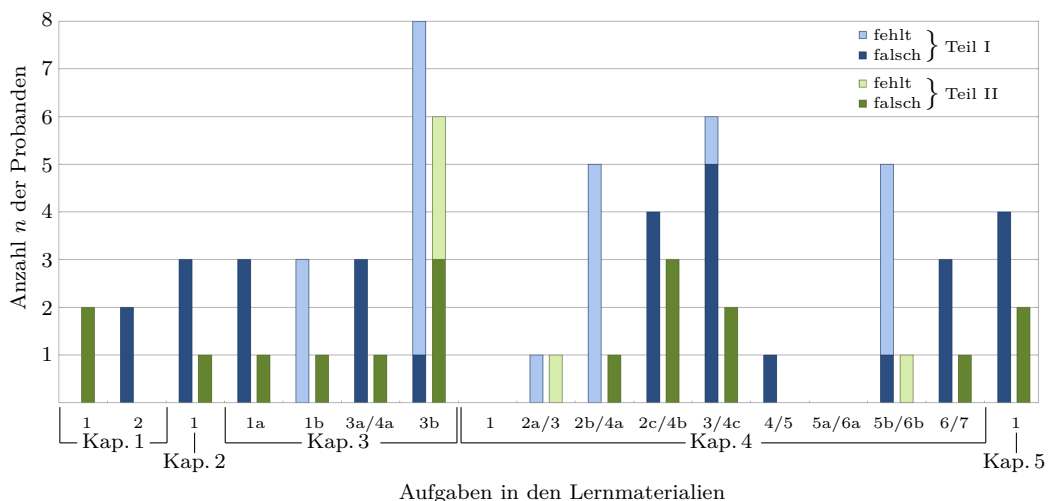
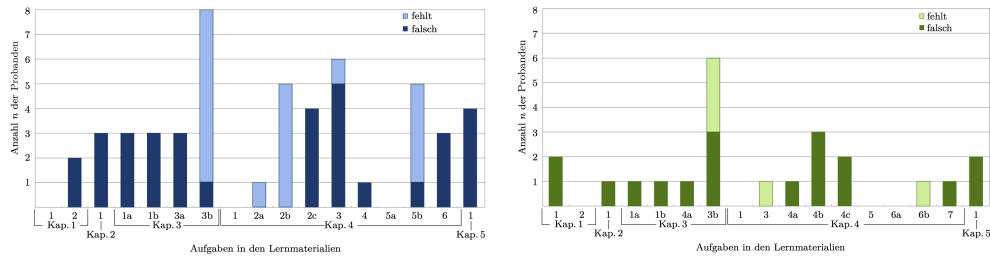


Abbildung 5.13: Die Lernmaterialversionen im Vergleich – Anzahl der aufgetretenen Fehler innerhalb der einzelnen Aufgaben beim Bearbeiten der Lernmaterialien.

Die Grafik zeigt einen Überblick über die gemachten Fehler innerhalb der vergleichbaren Aufgaben. Es wird deutlich, dass innerhalb dieser Aufgaben im zweiten Teil der Hauptstudie weniger Fehler gemacht und weniger Aufgaben ausgelassen werden. Für eine deutlichere Gegenüberstellung zeigt Abbildung 5.14 die Häufigkeiten der Fehler und der ausgelassenen Aufgaben jeweils in dem ersten und dem zweiten Teil der Hauptstudie.



(a) Teil I der Hauptstudie ($\sum_{\text{falsch}} = 30$, $\sum_{\text{fehlt}} = 21$). (b) Teil II der Hauptstudie ($\sum_{\text{falsch}} = 18$, $\sum_{\text{fehlt}} = 5$).

Abbildung 5.14: Gegenüberstellung der Anzahl der aufgetretenen Fehler und ausgelassenen Aufgaben in den 17 vergleichbaren Aufgaben beider Lernmaterialversionen.

Werden die Häufigkeiten der aufgetretenen Fehler, der ausgelassenen und der korrekt gelösten Aufgaben aufsummiert, können die Lernmaterialversionen miteinander verglichen werden. Folgende Tabelle 5.12 zeigt die Summe der Häufigkeiten in den einzelnen Kapiteln sowie die Gesamtsummen:

Tabelle 5.12: Summe der Häufigkeiten der gemachten Fehler, ausgelassenen und korrekt gelösten Aufgaben innerhalb der einzelnen Kapitel.

Kap.	Anzahl Aufgaben	Teil I			Teil II		
		korrekt	falsch	fehlt	korrekt	falsch	fehlt
1	2	24	2	0	24	2	0
2	1	9	3	0	11	1	0
3	4	31	7	10	39	6	3
4	9	89	14	11	105	7	2
5	1	9	4	0	11	2	0
Σ	17	162	30	21	190	18	5

Allerdings muss dabei beachtet werden, dass ein Proband für das Bearbeiten mehrerer Aufgaben in die Lösungen schaut. Dies muss für den Vergleich beider Lernmaterialversionen berücksichtigt werden. Dazu werden in den vergleichbaren Aufgaben, die der Proband nur mit Hilfe der

Lösungen bearbeitet, sowohl im ersten Teil als auch im zweiten Teil der Hauptstudie jeweils eine korrekt gelöste Aufgabe abgezogen.⁷⁷ In der letzten Zeile, in der die Gesamtsummen dargestellt sind, lässt sich mittels einer 2x3-Tabelle und dem χ^2 -Test zeigen, dass es sich mit $\chi^2 = 15,07$ und $\delta f = 2$ bei dem Vergleich der beiden Lernmaterialversionen um einen hoch signifikanten Unterschied ($p < 0,001$) hinsichtlich der Anzahl der Fehler, der ausgelassenen und korrekt gelösten Aufgaben handelt. Zudem lässt sich die Effektstärke d nach Cohen der beiden unabhängigen Stichproben für die korrekt gelösten Aufgaben berechnen. Dazu werden die Mittelwerte μ_I und μ_{II} für die vergleichbaren korrekt gelösten Aufgaben mit den zugehörigen Standardabweichungen σ_I und σ_{II} der beiden Teile der Hauptstudie betrachtet. Für die Effektstärke d nach Cohen gilt (vgl. Bühner & Ziegler 2009, S. 178):

$$d = \frac{\mu_I - \mu_{II}}{\sigma} \quad (5.4)$$

Für Gleichung 5.4 wird angenommen, dass $\sigma_I = \sigma_{II} = \sigma$. Da aber $\sigma_I \neq \sigma_{II}$ wird die gepoolte Standardabweichung $\hat{\sigma}$ berechnet, bei gleicher Stichprobengröße (vgl. ebd., S. 258):

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2}{2}} \quad (5.5)$$

Mit $\sigma_I = 2,40$ und $\sigma_{II} = 1,59$ ergibt sich für die gepoolte Standardabweichung $\hat{\sigma} = 2,04$. Mit Hilfe von Gleichung 5.4, den Mittelwerten $\mu_I = 9,53$ und $\mu_{II} = 11,18$ und der gepoolten Standardabweichung ergibt sich für die Effektstärke $d = 0,81$, womit es sich – nach der Klassifizierung von Cohen – um einen großen Effekt handelt (vgl. ebd., S. 181). Daraus kann geschlossen werden, dass die Veränderung der Lernmaterialien aus dem ersten Teil der Hauptstudie insgesamt eine Verbesserung dieser darstellt.

Werden die einzelnen Kapitel betrachtet, wird deutlich, dass in den Kapiteln zwei, drei, vier und fünf hinsichtlich der Zahl der korrekt gelösten, der ausgelassenen und der falsch gelösten Aufgaben ein Unterschied zu verzeichnen ist. Es werden weniger Fehler gemacht, weniger Aufgaben ausgelassen und stattdessen mehr Aufgaben korrekt gelöst. Ein signifikanter Unterschied zeigt sich in dem vierten und fünften Kapitel. Die

⁷⁷ Dabei handelt es sich um folgende Aufgaben: 2A1, 3A1a, b, 3A3b, 3A4a, 4A6a, b und 4A7 (vgl. Interview IV). In Tabelle 5.12 wurde innerhalb dieser Aufgaben jeweils eine als korrekt gelöste Aufgabe abgezogen.

Ergebnisse des Lückentextes aus dem fünften Kapitel und die der Aufgaben aus dem vierten Kapitel können zusammengefasst werden, da sich der Lückentext hauptsächlich auf die Inhalte aus dem vierten und fünften Kapitel bezieht. Mit einem Wert von $\chi^2 = 10,75$ bei $\delta f = 2$ und $p = 0,005$ unterscheiden sich das Auftreten der gemachten Fehler, das Auslassen und das korrekte Lösen der Aufgaben im zweiten Teil der Hauptstudie sehr signifikant von dem ersten Teil. Für die korrekt gelösten Aufgaben innerhalb des vierten und fünften Kapitels beträgt die Effektstärke $d = 1,04$, womit es sich um einen großen Effekt handelt. Im dritten Kapitel liegt der Unterschied mit $\chi^2 = 4,76$ ($\delta f = 2$) bei $p = 0,093$ und damit über dem Signifikanzniveau von 5%. An dieser Stelle muss allerdings hervorgehoben werden, dass in diesem Kapitel die Aufgaben bestehen geblieben sind, die den Schülern bereits im ersten Teil der Hauptstudie keine beziehungsweise kaum Schwierigkeiten bereitet haben. Werden die Häufigkeiten der Fehler aller Aufgaben des dritten Kapitels aus dem ersten und dem zweiten Teil der Hauptstudie miteinander verglichen, handelt es sich um einen hoch signifikanten Unterschied (mit $\chi^2 = 14,47$, $\delta f = 2$ und $p < 0,001$). Jedoch sind die Aufgaben nur bedingt miteinander vergleichbar, da der Schwierigkeitsgrad der neuen Aufgaben des dritten Kapitels in der Lernmaterialversion des zweiten Teils der Hauptstudie geringer einzustufen ist als in der Version des ersten Teils. Jedoch scheinen die neuen Aufgabenteile hinsichtlich der Inhalte besser an die bestehenden Aufgaben angepasst zu sein und die Schüler weniger kognitiv zu belasten.

Im ersten Kapitel führen die minimalen Anpassungen der Lernmaterialien zu keiner deutlichen Verbesserung hinsichtlich der Aufgaben und der ersten Aufgabe im Wissenstest, in der die Bestandteile des menschlichen Auges beschriftet werden sollen. Da bereits im ersten Teil der Hauptstudie kaum Schwierigkeiten im ersten Kapitel der Lernmaterialien aufgetreten sind, kann auch bei der nur minimalen Anpassung keine deutliche Verbesserung erwartet werden. Allerdings wird durch die erste Aufgabe im Wissenstest deutlich, dass besonders die Linse und die Netzhaut als Bestandteile korrekt beschriftet werden können. Diese werden dementsprechend in den Lernmaterialien häufig wiederholt, sodass sich die Schüler deren Position im Querschnitt des Auges besser einprägen. Die anderen Begriffe (Iris, Pupille, Sehnerv) werden von den Schülern weniger verinnerlicht, was damit zu begründen ist, dass diese Begriffe in den Lernmaterialien nicht wiederholt werden.

Im zweiten Kapitel kann ebenfalls von einer minimalen Änderung gesprochen werden. Die Schüler werden im zweiten Teil der Hauptstudie mit einem Tipp in der Aufgabenstellung darauf aufmerksam gemacht, dass die Wege des Lichts in Form von Pfeilen eingezeichnet werden sollen. Wie in Tabelle 5.13 zu sehen, wird der Weg des Lichts in dem zwei-

Tabelle 5.13: Den Weg des Lichts in Form von Pfeilen gezeichnet.

	Teil I	Teil II
Pfeile gezeichnet	7 (53,9%)	10 (76,9%)
Pfeile nicht gezeichnet	6 (46,1%)	3 (23,1%)

ten Teil der Hauptstudie zwar von mehr Probanden in Form von Pfeilen gezeichnet, allerdings handelt es sich dabei nicht um einen signifikanten Unterschied. Es muss jedoch betont werden, dass die Schüler im zweiten Teil der Hauptstudie nicht direkt dazu aufgefordert werden, den Weg des Lichts in Form von Pfeilen zu zeichnen, sondern ihnen die Pfeilform durch einen Tipp vorgeschlagen wird.

Die Veränderungen im dritten Kapitel führen dazu, dass in allen Aufgaben des dritten Kapitels signifikant ($\chi^2 = 14,47$, $\delta f = 2$ und $p < 0,001$) weniger Fehler auftreten, weniger Aufgaben ausgelassen und mehr Aufgaben korrekt gelöst werden. In der ersten Aufgabe sollen die gestrichelten Linien von den Schüler zum Beschriften des Querschnitts des Auges mit den Begriffen Linse und Netzhaut genutzt werden. Die Linien werden jedoch von nur acht Probanden (61,5%) genutzt. Die restlichen fünf Probanden (38,5%) nutzen die Linien nicht und sind eher durch diese verwirrt (vgl. z. B. Interview IV zu Kap. 1-3 #00:02:18-9# - #00:02:23-3#). Das Einfügen der gestrichelten Linien wird aufgrund dessen nicht als eine Verbesserung angesehen. Die zweite Aufgabe, in der die Schüler an die Konstruktion der drei Teilstrahlen herangeführt werden, wird nicht nur von allen Schüler korrekt gelöst, sondern bereitet sie zudem auf die eigenständige Konstruktion der Teilstrahlen vor. In dem darauf folgenden ersten Aufgabenteil der dritten Aufgaben, in dem die Schüler den zweiten und dritten Teilstrahl zeichnen sollen, werden keine Fehler begangen (vgl. Abbildung 5.8, 3A3a). Dass keine Fehler beim Zeichnen der Teilstrahlen gemacht werden, kann mit den eingespeisten Tipps begründet werden. Dabei ist der Tipp, in dem darauf hingewiesen wird, beim Zeichnen des dritten Teilstrahls an der Netzhaut zu beginnen, komplett neu. Der andere Tipp wurde aus der vorigen Version der Lernmateriali-

en übernommen. Der zweite Aufgabenteil der dritten Aufgabe (3A3b), in der die Brennpunkte beschriftet werden sollen, wird von drei Probanden falsch gelöst und von drei weiteren Probanden ausgelassen. Da im ersten Teil der Hauptstudie hier bereits die Fehler- und Auslassquote ähnlich hoch war, kann hinsichtlich dieses Aufgabenteils nicht von einer Verbesserung gesprochen werden. Um die Schüler stärker auf die Brennpunkte beziehungsweise die Aufgabenstellung aufmerksam zu machen, sind in der Lernmaterialversion des zweiten Teils der Hauptstudie gestrichelte Linien unter dem ersten und über dem zweiten Brennpunkt vorhanden. Auf diese Linien sollen die Brennpunkte als Begriffe eingetragen werden. Die sechs Probanden übersehen die Aufgabenstellung, da diejenigen, die diesen Aufgabenteil fehlerhaft lösen, zwar die Linien sehen, aber falsche Begriffe eintragen (z. B. 2. und 3. Teilstrahl oder Linse und Netzhaut). Ein Übersehen der Aufgabenstellung lässt sich auch auf den zweiten Aufgabenteil der vierten Aufgabe (3A4b) beziehen. Dieser Aufgabenteil, in dem die Schüler den Punkt auf der Netzhaut markieren sollen, an dem sich die drei Teilstrahlen treffen, wird von vier Probanden übersehen und ausgelassen. Eine Vermutung wäre, dass diese beiden Aufgabenteile (3A3b und 3A4b) hauptsächlich übersehen werden, da sie sich unterhalb des Zeichenbereichs befinden. Im vierten Kapitel steht die dritte Aufgabe (4A3), welche ebenfalls die Schüler dazu auffordert, den Treffpunkt der Teilstrahlen auf der Netzhaut zu markieren, nicht unter, sondern über dem Zeichenbereich. Der Punkt wird von zwölf Probanden korrekt markiert und von nur einem Probanden ausgelassen. Damit kann die Vermutung gestützt werden, dass ein Übersehen der Aufgabe mit dessen Position zusammenhängt.

Im vierten und fünften Kapitel besteht, wie bereits erwähnt, ein signifikanter Unterschied in den bestehen gebliebenen Aufgaben hinsichtlich der aufgetretenen Fehler, der ausgelassenen und der korrekt gelösten Aufgaben ($\chi^2 = 10,75$ bei $\delta f = 2$ und $p = 0,005$). Bei den Veränderungen innerhalb des vierten Kapitels kann somit insgesamt von einer Verbesserung gesprochen werden. Die neu konzipierte zweite Aufgabe scheint die Schüler im Verstehensprozess zu unterstützen. Diese wird von einem Schüler falsch und von den restlichen zwölf Schülern korrekt gelöst (vgl. Abbildung 5.8, 4A2). Sowohl die neu konzipierte zweite Aufgabe als auch die Veränderungen in der darauf folgenden dritten und vierten Aufgabe, wobei die vierte Aufgabe aus drei Teilen besteht, können als Verbesserungen

angesehen werden, da die Schüler weniger Fehler begehen und dadurch mehr Schüler diese Aufgabenteile korrekt lösen. Da die Aufgaben stark miteinander interagieren, werden im weiteren Verlauf des Kapitels sowie im Lückentext des fünften Kapitels Folgefehler vermieden.

Neben den inhaltlichen Anpassungen der einzelnen Kapitel gab es zudem allgemeine und formale Anpassungen. Die Nutzung eines Lineals sollte durch das Symbol neben jeder Aufgabenstellung, die zeichnerisch gelöst werden soll, gefördert werden. Wie in Tabelle 5.14 zu sehen, nutzen durch

Tabelle 5.14: Verwendung eines Lineals beim Zeichnen.

	Teil I	Teil II
Lineal verwendet	7 (53,9%)	13 (100%)
Lineal nicht verwendet	6 (46,1%)	0 (0%)

die Veränderung alle Probanden ein Lineal innerhalb der zeichnerisch zu lösenden Aufgaben. Der Unterschied zwischen den beiden Lernmaterialversionen hinsichtlich der Verwendung eines Lineals ist nach der Yates-/Kontinuitätskorrektur signifikant ($\chi^2 = 5,42$ bei $\delta f = 1$ und $p = 0,020$). Das Einfügen des Symbols kann somit als eine Verbesserung angesehen werden.

5.4.6 Dritte Anpassung der Lernmaterialien

Bei der zweiten Anpassung der Lernmaterialien handelt es sich um eine signifikante Verbesserung, da im zweiten Teil der Hauptstudie insgesamt signifikant weniger Fehler begangen oder Aufgaben ausgelassen werden. Somit basiert die dritte Anpassung der Materialien auf geringfügigen Änderungen. In dem ersten und dem fünften Kapitel werden keine Änderungen vorgenommen. In den Kapiteln zwei, drei und vier werden keine neuen Aufgaben formuliert oder bestehende Aufgaben entfernt, sondern leicht verändert.⁷⁸ Die dritte Anpassung der Lernmaterialien verfolgt folgende Ziele:

- Die Wege des Lichts im zweiten Kapitel sollen in Form von Pfeilen gezeichnet werden.
- Die Parallelität zur optischen Achse des ersten und dritten Teilstrahls soll beim Zeichnen berücksichtigt werden.

⁷⁸ Die vierte Version der Lernmaterialien befindet sich im Anhang auf Seite 255ff.

- Die Aufgabenstellungen, die sich bisher unterhalb des Zeichenbereichs befinden, sollen nicht mehr übersehen werden.

Für das zweite Kapitel besteht die Zielsetzung darin, dass die Probanden den Weg des Lichts von der Taschenlampe ausgehend in Form von Pfeilen zeichnen sollen. Dadurch wird der Tipp, beide Wege in Form von Pfeilen zu zeichnen, in die Aufgabenstellung integriert, sodass die Schüler direkt dazu aufgefordert werden, die Pfeilform zu verwenden.

Im dritten Kapitel werden die gestrichelten Linien innerhalb der ersten Aufgabe entfernt, die zur Beschriftung der Linse und der Netzhaut dienen sollten. Die Linien wurden nicht von allen Probanden genutzt und teilweise als verwirrend empfunden. Alternativ zum Entfernen der Linien, hätten diese deutlicher als Beschriftungslinien hervorgehoben werden können, indem sie mit den beiden Bestandteilen im Querschnitt des Auges verbunden worden wären. Jedoch soll sich durch die eigenständige Zuordnung die erste Gedächtnisspur hinsichtlich der Begriffe und deren Position festigen. Wenn die Schüler unsicher sind, besteht die Möglichkeit des Zurückblätterns. Durch Verbindungslinien zu den Beschriftungslinien würde der Schwierigkeitsgrad der Aufgabe sinken. Da diese Aufgabe im zweiten Teil der Hauptstudie jedoch von nur einem Probanden falsch gelöst wird, ist eine Verringerung des Schwierigkeitsgrades nicht notwendig. In der zweiten Aufgabe werden die Schüler an die Konstruktion der drei Teilstrahlen herangeführt, um in den danach folgenden Aufgaben die Teilstrahlen eigenständig zu zeichnen. Für die Konstruktion der Teilstrahlen kann als Zielstellung formuliert werden, dass diese sauber und korrekt erfolgen soll. Dazu muss den Schülern bewusst sein, dass der erste Teilstrahl im Bereich vor der Linse und der dritte Teilstrahl im Bereich hinter der Linse Parallelstrahlen zur optischen Achse sind. In dem zweiten Teil der Hauptstudie stellt sich heraus, dass die Parallelität nur durch die Zeichnung nicht deutlich wird, da 61,5% der Probanden die Teilstrahlen nicht als Parallelstrahlen zeichnen (vgl. Abbildung 5.12, S. 192). Im Interview äußert ein Proband den Verbesserungsvorschlag, dass deutlich gemacht werden sollte, dass der erste Abschnitt des ersten Teilstrahls und der zweite Abschnitt des dritten Teilstrahls parallel zur optischen Achse verlaufen und der Begriff parallel in diesem Zusammenhang genannt werden sollte (vgl. Interview IV Abschluss #00:03:15-3# - #00:05:29-8#). Aus diesem Grund wird innerhalb der sukzessiven Erklärung zur Konstruktion der drei Teilstrahlen zusätzlich darauf eingegangen, dass sowohl der erste als

auch der dritte Teilstrahl in den genannten Bereichen parallel zur optischen Achse verlaufen. Die erklärenden Textabschnitte zum ersten und dritten Teilstrahl werden folgendermaßen verändert:

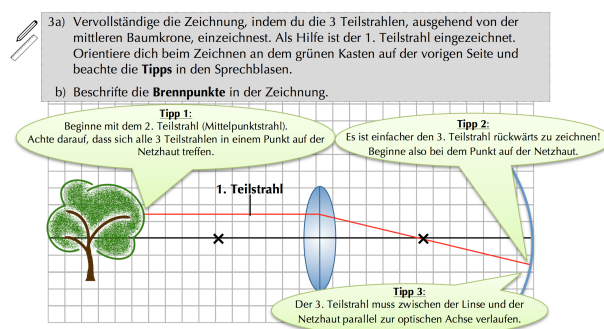
- Der **1. Teilstrahl** verläuft vor der Linse **parallel** zur optischen Achse. Zwischen der Linse und der Netzhaut schneidet er die optische Achse. Hier befindet sich der **Brennpunkt** des 1. Teilstrahls.
- Der **3. Teilstrahl** schneidet die optische Achse zwischen der Linse und dem Baum. Hier liegt der **Brennpunkt** des 3. Teilstrahls. Hinter der Linse verläuft er **parallel** zur optischen Achse.

Dass es sich bei dem ersten beziehungsweise dem dritten Teilstrahl im Bereich vor beziehungsweise hinter der Linse um Parallelstrahlen handelt, wird hier nur in textlicher Form erklärt. Der jeweilige Abschnitt des Parallelstrahls hätte in der nebenstehenden Zeichnung zusätzlich kenntlich gemacht werden können. Jedoch wäre die Abbildung dadurch überladen, sodass auf andere Informationen hätte verzichtet werden müssen. Die Position des Brennpunktes zieht sich durch die restlichen Kapitel der Lernmaterialien, sodass deren Präsenz auch innerhalb der Aufgaben bestehen bleiben sollte. Der parallele Verlauf der Teilstrahlen hingegen ist erst bei deren Konstruktion von Bedeutung. Es bietet sich aus diesem Grund an, die Parallelität hier zunächst zu nennen und beim Zeichnen der Teilstrahlen erneut aufzugreifen. Aus diesem Grund wird in der darauffolgenden dritten Aufgabe, in der die Schüler den zweiten und dritten Teilstrahl

zeichnen sollen, ein zusätzlicher Tipp eingefügt.

Der dritte Tipp soll die Schüler darauf aufmerksam machen, dass der dritte Teilstrahl zwischen Linse und Netzhaut parallel zur optischen Achse ver-

laufen muss, sodass die Schüler dies beim Zeichnen berücksichtigen. Durch die zusätzliche Hilfestellung werden die Hilfestellungen insgesamt zwar maximiert, jedoch ist der Zeichenbereich dadurch sehr überfüllt. Die gestrichelten Linien für die Beschriftung der Brennpunkte werden entfernt und der b)-Teil der Aufgabenstellung befindet sich nun nicht



mehr unter dem Zeichenbereich, sondern direkt unter dem a)-Teil über dem Zeichenbereich. Die Probanden aus dem zweiten Teil der Hauptstudie haben besonders die Aufgabenteile ausgelassen, die sich unterhalb des Zeichenbereichs befinden. Aus diesem Grund wird nicht nur in der obenstehenden dritten Aufgabe der zweite Teil über dem Zeichenbereich positioniert, sondern auch in der darauf folgenden vierten Aufgabe. Hier besteht der zweite Aufgabenteil darin, den Punkt auf der Netzhaut zu markieren, an dem die Teilstrahlen zusammentreffen.

Innerhalb der fünften Aufgabe (3A5) sollen die Schüler weiterhin eigenständig die drei Teilstrahlen konstruieren. Allerdings besteht die Anpassung dieser Aufgabe darin, dass der Ausgangspunkt der Teilstrahlen vorgegeben wird. Dadurch ähnelt die Aufgabenstellung nicht mehr dem Zielfreiheitseffekt. Dieser hat im zweiten Teil der Hauptstudie dazu geführt, dass teilweise die Mitte des Baumes als Ausgangspunkt gewählt wurde, was dem Spezialfall entspricht, dass alle Teilstrahlen auf der optischen Achse entlang verlaufen. Die Probanden sind durch diesen Fall verwirrt, sodass durch die Vorgabe des Ausgangspunktes Sicherheit gegeben werden soll. Für die Vorgabe des Ausgangspunktes spricht zudem, dass die Schüler in dieser Aufgabe das erste Mal mit dem eigenständigen Zeichnen aller drei Teilstrahlen konfrontiert werden, wodurch sie nicht durch die Wahl des Ausgangspunktes abgelenkt und verunsichert werden sollten.

Im vierten Kapitel wird die sechste Aufgabe (4A6) angepasst, in der die Schüler die drei Teilstrahlen bei verschobener Netzhaut konstruieren sollen. Um zu erkennen, dass sich die Brennpunkte bei verschobener Netzhaut ebenfalls verschieben müssen, sollen die Schüler so genau wie möglich zeichnen. Dafür ist es von zentraler Bedeutung, dass es sich bei dem ersten Abschnitt des ersten Teilstrahls und beim zweiten Abschnitt des dritten Teilstrahls jeweils um Parallelstrahlen zur optischen Achse handelt. Dazu wird einerseits der zweite Tipp erweitert und andererseits ein neuer dritter Tipp eingefügt. Im zweiten Tipp werden die Schüler dazu aufgefordert, den dritten Teilstrahl von der Netzhaut ausgehend zu zeichnen und darauf zu achten, dass dieser Teilstrahl zwischen der Linse und der Netzhaut parallel zur optischen Achse verläuft. Diese beiden Informationen werden, im Gegensatz zu den Tipps in der dritten Aufgabe des dritten Kapitels, zusammengefasst. Da es sich dabei um eine Wiederholung der Tipps handelt und sich beide auf den dritten Teilstrahl beziehen, bietet

sich eine Zusammenfassung dieser an. Der dritte und neue Tipp bezieht sich auf den ersten Teilstrahl, indem darauf hingewiesen wird, dass dieser Teilstrahl im Bereich zwischen dem Gegenstand und der Linse parallel zur optischen Achse verläuft.

5.5 Hauptstudie – Teil III

Die dritte Anpassung der Lernmaterialien umfasst kleine Veränderungen, die dazu führen sollen, dass die Wege des Lichts im zweiten Kapitel in Form von Pfeilen gezeichnet werden, der erste und dritte Teilstrahl in dem jeweiligen Bereich als Parallelstrahl gezeichnet wird und diejenigen Aufgabenstellungen nicht mehr übersehen werden, die sich zuvor unterhalb der Zeichenbereiche befanden. Diese Zielsetzungen lassen sich allein durch das Ausfüllen der Lernmaterialien überprüfen. Eine Durchführung des Wissenstests und des Interviews ist für den dritten Teil der Hauptstudie nicht notwendig. Es kann jedoch nicht erwartet werden, dass sich die Anzahl der korrekt und falsch gelösten sowie der ausgelassenen Aufgaben von denen des zweiten Teils der Hauptstudie unterscheidet.

Der dritte Teil der Hauptstudie wird mit 6 Schülerinnen und 7 Schülern durchgeführt, damit beläuft sich die Probenzahl auch hier wieder auf 13. Die Probanden befinden sich in einem Alter von 10 bis 13 Jahren, wobei 4 der Probanden 11 Jahre alt sind ($\varphi = 1$, $\sigma = 3$). Ebenfalls 4 Probanden befinden sich in einem Alter von 13 Jahren ($\varphi = 2$, $\sigma = 2$), 3 Probandinnen in einem Alter von 12 Jahren und 2 Probanden ($\sigma = 2$) sind 10 Jahre alt. Das Durchschnittsalter liegt damit bei $\bar{O} = 11,69$ Jahren. Die Probanden besuchen unterschiedliche Gymnasien. 8 Probanden ($\varphi = 4$, $\sigma = 4$) befinden sich in der 6., 4 Probanden ($\varphi = 2$, $\sigma = 2$) in der 7. und 2 Probanden ($\sigma = 2$) in der 5. Klassenstufe. Damit ist auch die Stichprobe des dritten Teils der Hauptstudie mit denen der ersten beiden Teile vergleichbar.

Beschreibung und Interpretation der Ergebnisse

Für den dritten Teil der Hauptstudie findet die Auswertung der Lernmaterialien zunächst hinsichtlich der begangenen Fehler und der ausgelassenen Aufgaben statt. Folgende Abbildung zeigt die absolute Häufigkeit

der Probanden, die Aufgaben beim Bearbeiten der Lernmaterialien falsch lösen und auslassen.⁷⁹

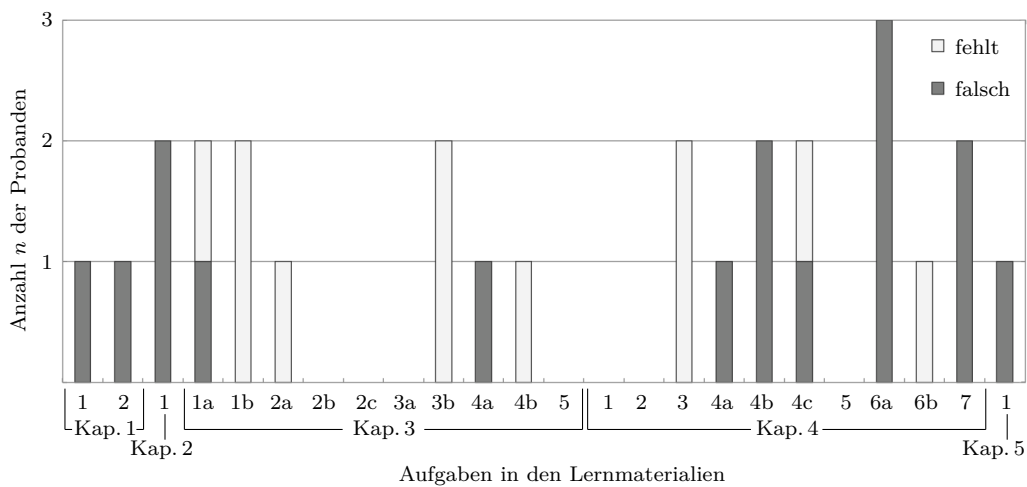


Abbildung 5.15: Hauptstudie Teil III – Anzahl der aufgetretenen Fehler innerhalb der einzelnen Aufgaben beim Bearbeiten der Lernmaterialien.

Für einen Vergleich der Lernmaterialversionen aus dem zweiten und dem dritten Teil der Hauptstudie können alle Aufgaben herangezogen werden. Folgende Tabelle 5.15 zeigt die Gesamtsumme der Häufigkeiten der begangenen Fehler, der ausgelassenen und der korrekt gelösten Aufgaben.

Tabelle 5.15: Vergleich Teil II und III – Gesamtsumme der Häufigkeiten der gemachten Fehler, ausgelassenen und korrekt gelösten Aufgaben.

	Teil II	Teil III
korrekt	282	285
falsch	21	16
fehlt	9	11

Durch den χ^2 -Test ($\chi^2 = 0,89$ mit $\delta f = 2$ und $p = 0,640$) wird deutlich, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Lernmaterialversionen des zweiten und dritten Teils der Hauptstudie hinsichtlich der Fehler, der ausgelassenen und der korrekt gelösten Aufgaben gibt. So wird deutlich, dass auch im dritten Teil der Hauptstudie in jedem Kapitel der Lernmaterialien Fehler gemacht werden. Jedoch sticht keine der Aufgaben durch eine hohe Fehlerzahl heraus. Die höchste Fehlerzahl, die mit drei Probanden bei 23,1% liegt, findet sich in dem ersten Teil der sechsten

⁷⁹ Auf eine detaillierte Fehleranalyse wird an dieser Stelle verzichtet, da dies bereits im zweiten Teil der Hauptstudie erfolgt ist und die begangenen Fehler in den Lernmaterialien mit denen aus dem zweiten Teil der Hauptstudie vergleichbar sind.

Aufgabe im vierten Kapitel (4A6a). Dabei geht es um die Konstruktion der drei Teilstrahlen bei verschobener Netzhaut. In den Aufgaben, in denen die Probanden die drei Teilstrahlen konstruieren sollen, wird sowohl im dritten als auch im vierten Kapitel deutlich, dass alle Probanden die Parallelität beachten, auch wenn die Konstruktion (4A6a) fehlerhaft ist. Ein Proband verwendet beim Zeichnen kein Lineal, bemüht sich aber dennoch, den ersten Teilstrahl im Bereich vor der Linse und den dritten Teilstrahl im Bereich hinter der Linse parallel zur optischen Achse zu zeichnen. Eine der Zielsetzung für die Anpassung der Lernmaterialien ist, dass die Parallelität zur optischen Achse des ersten und dritten Teilstrahls beim Zeichnen berücksichtigt werden soll. Aufgrund dessen wird in der Erklärung zur Konstruktion der Teilstrahlen auf die Parallelität hingewiesen und in die Aufgaben zur Konstruktion sind Tipps eingespeist, die auf die Parallelität aufmerksam machen. Folgende Tabelle 5.16 zeigt den Vergleich zwischen dem zweiten und dritten Teil der Hauptstudie hinsichtlich der Zeichnung der Parallelstrahlen.

Tabelle 5.16: Vergleich Teil II und III – Zeichnen der Abschnitte der Teilstrahlen als Parallelstrahlen.

	Teil II	Teil III
parallel gezeichnet	5 (38,5%)	13 (100%)
nicht parallel gezeichnet	8 (61,5%)	0 (0%)

Nach der Yates-/Kontinuitätskorrektur erweist sich der Unterschied hier als sehr signifikant ($\chi^2 = 8,85$ bei $\delta f = 1$ und $p = 0,003$). Die vorgenommenen Anpassungen stellen sich somit deutlich als Verbesserungen heraus.

Eine weitere zu überprüfende Zielsetzung liegt in dem Zeichnen der Wege des Lichts (2A1 und 3A1a) in Form von Pfeilen. Dabei soll hier auch die Anzahl der Probanden aus dem ersten Teil der Hauptstudie als Vergleichswert berücksichtigt werden, da sich die Aufgabe nur hinsichtlich des Tipps verändert hat. Wie in Tabelle 5.17 zu sehen, zeichnen mehr Probanden die Wege des Lichts in Form von Pfeilen. Jedoch ist der Unterschied weder zwischen dem dritten und dem zweiten Teil, noch zwischen dem dritten und dem ersten Teil signifikant. Dennoch kann die Veränderung in der Aufgabe des zweiten Kapitels (2A1), in der die Schüler dazu aufgefordert werden, den Weg des Lichts in Form von Pfeilen zu zeichnen, als eine Verbesserung dieser angesehen werden, da besonders

Tabelle 5.17: Vergleich Teil I, II und III – Den Weg des Lichts in Form von Pfeilen gezeichnet.

	Teil I	Teil II	Teil III
Pfeile gezeichnet	7 (53,9%)	10 (76,9%)	12 (92,3%)
Pfeile nicht gezeichnet	6 (46,1%)	3 (23,1%)	1 (7,7%)

im Vergleich zum ersten Teil der Hauptstudie deutlich mehr Probanden die Pfeilform verwenden. Dabei wird das Ziel verfolgt, dass die Schüler nicht darüber nachdenken müssen, ob die Wege des Lichts durch Pfeile gezeichnet werden sollen, da dies eine unnötige extrinsische kognitive Belastung darstellt.

Die dritte und letzte Zielsetzung für die Anpassung der Lernmaterialien besteht darin, dass die Aufgabe zur Beschriftung der Brennpunkte im dritten Kapitel (3A1b) sowie die darunter stehende Aufgabe (3A4b), in der die Schüler den Punkt markieren sollen, an dem sich drei Teilstrahlen auf der Netzhaut treffen, weniger oft ausgelassen wird. Tabelle 5.18 zeigt die Ergebnisse zu beiden Aufgabenteilen im Vergleich.

Tabelle 5.18: Vergleich Teil II und III – Auslassen der Aufgaben 3A3b und 3A4b.

	Teil II	Teil III
korrekt	16	23
fehlt	10*	3

*Die falschen Lösungen in 3A3b werden als fehlt gewertet, da diese auf ein Übersehen der Aufgabe hindeuten.

Der χ^2 -Test zeigt mit $\chi^2 = 5,03$ (bei $\delta f = 1$ und $p = 0,025$) einen signifikanten Unterschied hinsichtlich des Auslassens beider Aufgabenteile. In der vorigen Version befanden sich beide Aufgabenteile unterhalb des Zeichenbereichs, was dazu führte, dass einige Probanden diese Aufgabenstellungen übersehen haben. Für den weiteren Verlauf der Lernmaterialien sind diese Aufgabenteile wichtig, da sowohl die Position der Brennpunkte als auch der gemeinsame Treffpunkt der Teilstrahlen für das Verständnis der Fehlsichtigkeit eine zentrale Rolle spielen. Aus diesem Grund befinden sich die Aufgabenstellungen nun oberhalb des Zeichenbereichs. Da diese Aufgabenteile signifikant weniger ausgelassen werden, kann die neue Position der Aufgabenstellungen über den Zeichenbereich als eine Verbesserung innerhalb der Lernmaterialien angesehen werden.

5.6 Fazit, Diskussion und Ausblick der Evaluation

Die leitende Fragestellung, *welche Abschnitte der Lernmaterialien verbessert werden müssen*, wurde in mehreren Schleifen evaluiert. Bereits die Anpassungen nach dem ersten Teil der Hauptstudie stellen sich in dem zweiten Teil als Verbesserungen heraus, da die Probanden signifikant weniger Fehler begehen, weniger Aufgaben auslassen und mehr Aufgaben korrekt lösen. Wie im Vergleich der Lernmaterialversionen beschrieben, werden die Ergebnisse der Interviews bezogen auf die Häufigkeiten nicht dazu genutzt, herauszustellen, ob sich bei der angepassten Version der Lernmaterialien um eine Verbesserung dieser handelt. Bei der Analyse der Interviews handelt es sich um eine quantitative Inhaltsanalyse, mit der in erster Linie das Ziel verfolgt wird, herauszustellen, welche Aufgaben als schwierig empfunden werden, um in einem zweiten Schritt die Begründungen für die aufgetretenen Schwierigkeiten herauszustellen. Allerdings wird deutlich, dass sich die Begründungen für die aufgetretenen Schwierigkeiten seitens der Probanden im zweiten Teil der Hauptstudie oftmals auf eine erhöhte Anstrengung schließen lassen. Demnach sagen sie beispielsweise, dass sie über die Lösungen von einzelnen Aufgaben etwas länger nachdenken mussten.

Aus diesem Grund sind nach dem zweiten Teil der Hauptstudie nur geringfügige Anpassungen in den Lernmaterialien nötig, die dafür sorgen, dass die Probanden im dritten Teil der Hauptstudie die entsprechenden Aufgaben signifikant weniger auslassen und bei der Konstruktion der Teilstrahlen sauberer zeichnen. Die Anzahl der begangenen Fehler kann dabei nicht signifikant reduziert werden. Allerdings soll durch die Verbesserung der Lernmaterialien nicht das Ziel verfolgt werden, dass die Probanden keinerlei Fehler mehr in den Aufgaben begehen. Ziel soll es sein, die Schüler nicht unnötig extrinsisch kognitiv zu belasten. Sowohl die intrinsische kognitive Belastung, die individuell abhängig vom Vorwissen sein kann, als auch die individuelle Anstrengung der einzelnen Probanden sind für das Begehen einzelner Fehler verantwortlich. Diese sind durch die äußere Gestaltung der Lernmaterialien schwieriger zu beeinflussen.

Die Daten sind hinsichtlich enthaltener Schwierigkeiten ausgewertet worden mit dem Ziel, die Lernmaterialien zu verbessern. Jedoch hätte eine Auswertung der Daten auch im Hinblick auf das Gelingen der ein-

zelen Gestaltungsmaßnahmen erfolgen können. Als Beispiel lässt sich der Zielfreiheitseffekt anführen, dessen Wirksamkeit zwar empirisch belegt ist, der aber dennoch in der Kritik steht (siehe hierzu die Ausführungen auf Seite 90). In der Lernmaterialversion für den ersten Teil der Hauptstudie wird der Zielfreiheitseffekt in der vierten Aufgabe im dritten Kapitel (3A4) genutzt, indem die vorige Abbildung mit möglichst vielen Begriffen beschriftet werden soll. Acht Probanden lassen diese Aufgabe aus oder lösen sie falsch; zudem schätzen zehn Probanden diese Aufgabe als schwierig ein (vgl. Abbildung 5.2 auf Seite 161), wobei als Begründung mehrfach genannt wird, dass die Probanden nicht wissen, wie viele und welche Begriffe genutzt werden sollen. Den Probanden fehlt somit die konkrete Zielformulierung der Aufgabe, weil sie durch die fehlende Zielvorgabe verunsichert sind. Diese Aufgabe wird aufgrund der inhaltlichen Umstrukturierung des dritten Kapitels aus den Lernmaterialien entfernt. Im zweiten Teil der Hauptstudie wird der Zielfreiheitseffekt nur teilweise genutzt, indem die Schüler bei der Konstruktion der drei Teilstrahlen in der fünften Aufgabe des dritten Kapitels (3A5) den Ausgangspunkt selbst wählen sollen. Zwar ist das Ziel vorgegeben, dass die drei Teilstrahlen gezeichnet werden sollen, aber die Schüler können den Ausgangspunkt frei bestimmen. Diese Aufgabe wird von zwei Probanden falsch gelöst, indem sie versuchen die Teilstrahlen für den Spezialfall zu konstruieren, dass der Ausgangspunkt auf der optischen Achse liegt (vgl. Abbildung 5.11 auf Seite 191). Außerdem wird diese Aufgabe von vier Probanden als schwierig empfunden (vgl. Abbildung 5.8 auf Seite 184), weil ihnen die Aufgabenstellung unklar ist. Aufgrund dessen wird für die Abschlussversion der Lernmaterialien, die im dritten Teil der Hauptstudie getestet wird, der Ausgangspunkt der Teilstrahlen innerhalb dieser Aufgabe vorgegeben. Im dritten Teil der Hauptstudie wird diese Aufgabe von allen Probanden korrekt gelöst. Der Zielfreiheitseffekt wird mit jeder Anpassung der Lernmaterialien weniger genutzt, sodass dieser in der Abschlussversion nicht mehr umgesetzt wird.

Wird der Blick auf die Rahmengeschichte der Lernmaterialien gerichtet, die für jedes Kapitel in Form eines Advance Organizers aufgegriffen wird und sich zudem in den Aufgaben wiederfindet, wird deutlich, dass sie in allen Versionen der Lernmaterialien enthalten bleibt. Die Probanden äußern sich durchweg positiv über die Inhalte der Rahmengeschichte,

sodass sie nur hinsichtlich der in den Kapiteln behandelten Inhalte angepasst wird.

Ein weiteres Ergebnis ist, dass die Anzahl der Tipps mit jeder Anpassung der Lernmaterialien erhöht wird. Während in der Vorstudie insgesamt zwei Tipps enthalten sind, sind in der abschließenden Version neun Tipps in die Aufgaben eingespeist. Gleiches lässt sich auf die Erklärungen beziehen. Besonders die Erklärungen zur Konstruktion der drei Teilstrahlen erfolgen in der Abschlussversion viel kleinschrittiger als in der ersten Version. Auch die Verknüpfung zwischen der Länge des Augapfels, dem Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut und der Fehlsichtigkeit wird in der abschließenden Version expliziter herausgestellt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Hilfestellungen innerhalb der Lernmaterialien durch die Evaluation maximiert werden. Für rein schriftliche Lernmaterialien bietet es sich an, den Weg der maximalen Hilfestellungen zu gehen. Davon profitieren besonders diejenigen Schüler, die sich mit der Thematik schwertun. Diejenigen, denen beispielsweise die Konstruktion der drei Teilstrahlen leicht fällt, benötigen die Tipps nicht unbedingt, um die Aufgaben lösen zu können und ignorieren diese. Allerdings können zu viele Tipps, die sich auf dieselbe Aufgabe beziehen (beispielsweise, dass beim Konstruieren der Teilstrahlen sowohl die Erklärung zuvor als auch die Tipps berücksichtigt werden sollen – 3A3a) lernhinderliche Redundanzen (siehe Redundanzeffekt auf Seite 82) bei den Schülern erzeugen.

In Anbetracht dessen würde sich eine Präsentation der Tipps bei Bedarf anbieten. Entsprechend des Effekts vollständig ausgearbeiteter Lösungsbeispiele und des Umgangs mit diesen wird vorgeschlagen, vorgegebene Erklärungen oder Hilfestellungen erst auf Wunsch des Lernenden zu präsentieren (vgl. Seite 65). Damit kann ein Ausblick für den Einsatz der Lernmaterialien gegeben werden. Zum einen können die Lernmaterialien in der Abschlussversion direkt im Schulunterricht zum Einsatz kommen. Entweder im Doppeljahrgang 5/6 im Physikunterricht als Teil einer Unterrichtseinheit zur Phänomenorientierten Optik oder im Biologieunterricht als Einführung zu einer Unterrichtseinheit zum Auge als Sinnesorgan im Doppeljahrgang 7/8 (vgl. KC NW, S. 29, 81). Dafür rückt die Lehrkraft vermehrt in den Hintergrund. Hinsichtlich der angesprochenen Präsentation der Hilfestellungen bei Bedarf ist eine Interaktion zwischen Lehrkraft und Schüler unerlässlich. Die Lernmaterialien lassen sich auf den klassischen Schulunterricht adaptieren, was eine methodische Um-

strukturierung zur Folge hat. Dementsprechend kann beispielsweise die Geschichte über den kurzsichtigen Jungen, die für die einzelnen Kapitel den Advance Organizer darstellt, von der Lehrkraft vorgetragen werden. Die Vermutungen der Schüler, warum der Protagonist der Geschichte zum Augenarzt gehen sollte, könnte für alle sichtbar, beispielsweise an der Tafel, festgehalten werden. Bei der geradlinigen Ausbreitung von Licht kann die Lehrkraft bei der Fehlvorstellung von Sehstrahlen direkt eingreifen und diese korrigieren. Die Erklärung zur Konstruktion der drei Teilstrahlen kann innerhalb einer einzigen Zeichnung sukzessive an der Tafel oder durch Overlays mehrerer Folien am Tageslichtprojektor erfolgen. Die Hilfestellungen beim eigenständigen Zeichnen der Teilstrahlen seitens der Schüler können durch die Lehrkraft bei Bedarf präsentiert werden. Hier besteht die Möglichkeit zu differenzieren. So können die Lernmaterialien praktikabel für den alltäglichen Schulunterricht gemacht werden. Mit Blick auf die Effekte der Cognitive Load Theorie rückt hier besonders der Modalitätseffekt (siehe Seite 80) in den Vordergrund, der besagt, dass die multimodale Präsentation der Inhalte einer monomodalen Darstellung derselben Inhalte überlegen ist. Werden die Inhalte also über mehrere Sinne aufgenommen, ist dies lernförderlicher, da die extrinsische kognitive Belastung reduziert wird. An dieser Stelle kann wieder die Erklärung der Konstruktion der drei Teilstrahlen als Beispiel genannt werden. Wenn die Teilstrahlen an nur einer Zeichnung sukzessive erklärt werden und die in Textform präsentierten Inhalte von der Lehrkraft mündlich erklärt und durch die Zeichnung visualisiert werden, wird die extrinsische kognitive Belastung der Schüler noch weiter reduziert. Bei der Adaption der Lernmaterialien zu einer Unterrichtseinheit muss beachtet werden, dass eine Stückelung der Lernmaterialien nur bedingt Sinn ergibt. Die Aufgaben interagieren innerhalb der Kapitel stark miteinander, wobei die Elementinteraktivität im vierten und fünften Kapitel sogar kapitelübergreifend ist, indem diese die Inhalte der vorigen Kapitel voraussetzen. Es handelt sich demnach nicht um Einzelfakten, die in Isolation voneinander gelernt werden können.

Auch forschungsmethodisch kann hier ein Ausblick gegeben werden. Die entwickelten, evaluierten und dadurch verbesserten Lernmaterialien sind nicht hinsichtlich ihrer Lernförderlichkeit getestet worden. Durch das hier beschriebene forschungsmethodische Vorgehen wurden aufgetretene Schwierigkeiten bestmöglich aus den Lernmaterialien entfernt, ohne das

Anforderungsniveau der Aufgaben zu verändern. Jedoch lässt dies keine Aussage darüber zu, ob die so verbesserten Lernmaterialien gegenüber anderen Materialien, die im schulischen Kontext zum Einsatz kommen, überlegen sind. Es würde sich aus diesem Grund anbieten, die Lernmaterialien hinsichtlich ihrer Lernförderlichkeit mit zwei Schülergruppen zu testen. Dazu würde eine Gruppe mit herkömmlichen Materialien zu derselben Thematik mit denselben Lernzielen arbeiten, beispielsweise aus Schulbüchern oder Lernheften, und die andere Gruppe mit den hier evaluierten Lernmaterialien. Im Anschluss könnte eine summative Leistungserfassung, die für beide Schülergruppen gleich ist, Rückschlüsse auf die Verstehens- und Behaltensleistung bringen. Außerdem könnten Interviews zum Gefallen der Materialien geführt werden. Dieser Ansatz ist weniger der Didaktischen Entwicklungsforschung zuzuordnen, da vielmehr eine Bestätigung der umgesetzten Effekte der Cognitive Load Theorie im Vordergrund steht und somit technologisches Wissen überprüft wird. Eine mögliche Fragestellung könnte für diesen Ausblick sein, ob Lernmaterialien, die nach den Effekten der Cognitive Load Theorie gestaltet und optimiert wurden, lernförderlicher sind als herkömmliche Materialien aus Schulbüchern oder Lernheften. Dabei würde es sich um eine vergleichende Studie handeln.

Um im Sinne der Didaktischen Entwicklungsforschung weiterzuarbeiten, kann auch die aus den Lernmaterialien entstehende Unterrichtseinheit evaluiert werden. Zunächst mit dem Ziel, verschiedene Alternativen hinsichtlich des Lernerfolgs zu testen. Dabei handelt es sich um eine Klassenzimmerforschung, bei der beispielsweise Gruppendynamikprozesse zwischen den Schülern eine Rolle spielen. Die Lernmaterialien bieten dafür die Grundlage, da diese bereits in Form einer Laborforschung, in der die Schüler einzeln die Materialien bearbeitet haben, evaluiert wurden. Darauf aufbauend könnte eine vergleichende Studie die so konzipierte Unterrichtseinheit mit einer Unterrichtseinheit zu derselben Thematik und denselben Lernzielen hinsichtlich des Lernerfolgs und des Gefallens gegenüberstellen.

Kapitel 6

Schlussbetrachtung

Mit dieser Arbeit wurde das Ziel verfolgt, einen Beitrag zur Didaktischen Entwicklungsforschung zu leisten, indem theoretisches und technologisches Wissen angewendet wurde, um Lernmaterialien zu entwickeln, die für den Schulunterricht nutzbar sind. Im theoretischen Teil dieser Arbeit wurden Gestaltungskonzepte beschrieben, wie die Effekte der Cognitive Load Theorie, deren Wirksamkeit mehrfach, aber dennoch unabhängig voneinander empirisch bestätigt wurde. Das Ziel dieser Arbeit bestand also nicht darin, diese Effekte hinsichtlich ihrer Lernwirksamkeit zu testen. Vielmehr ging es darum, diese Effekte bestmöglich umzusetzen und für den Schulalltag praktikabel zu machen. In diesem Sinne sind die Lernmaterialien exemplarisch für die Umsetzung dieser Effekte zu sehen. Mit der Praktikabilität beschäftigte sich die Evaluation in dieser Arbeit, durch die Schwachstellen innerhalb der Lernmaterialien ausfindig gemacht und beseitigt wurden.

Durch das Vorgehen lassen sich Lernmaterialien entwickeln, die sowohl theoretisches als auch technologisches Wissen aufgreifen. Darüber hinaus lassen sich die Lernmaterialien durch die Evaluation optimieren und damit für die Unterrichtspraxis nutzbar machen. Durch die Evaluation kristallisieren sich Schwierigkeiten für die Schüler heraus, die bei der Erstellung nicht bedacht worden sind. Zwar wurden mögliche Verständnisschwierigkeiten für die Schüler im Vorfeld diskutiert, jedoch kann bereits eine einzelne fehlende Information dazu führen, dass die Inhalte nicht verstanden werden. Enthaltene Schwierigkeiten innerhalb von Unterrichtsmaterialien im Allgemeinen und auch innerhalb der Lernmaterialien aus dieser Arbeit können auf die Unterschiede bezüglich des Vorwissens seitens der Lernmaterialgestalter und der Lernenden zurückge-

führt werden. Dadurch können explizite Bezüge zwischen den Inhalten fehlen, die für das Verständnis der Schüler von zentraler Bedeutung sind. Die dadurch entstehenden Lücken können die Schüler unabhängig von ihrer Anstrengung nicht ausgleichen. Durch die Evaluation können diese Schwachstellen in den Lernmaterialien aufgedeckt und beseitigt werden. So fehlten beispielsweise explizite Bezüge im vierten Kapitel der in dieser Arbeit entwickelten und evaluierten Lernmaterialien. Die Schüler hatten Probleme mit der Verknüpfung zwischen der Länge des Augapfels, dem Abstand zwischen der Linse und Netzhaut und der Art der Fehlsichtigkeit. Durch ein kleinschrittigeres Vorgehen innerhalb der Aufgaben sowie zusätzliche Abbildungen und Aufgaben, die den genannten Zusammenhang verdeutlichen, konnte eine Verbesserung des vierten Kapitels erzielt werden. Bei der erstmaligen Entwicklung der Lernmaterialien erschien die inhaltliche Struktur bereits lückenlos, wobei dies auf das vielschichtiger Vorwissen zurückzuführen ist. Gleiches lässt sich für die Gestaltung von Unterrichtsmaterialien generalisieren, da die Unterrichts- beziehungsweise Lernmaterialgestalter über ein höheres fachliches Vorwissen verfügen als die Schüler, die später mit den Materialien lernen sollen. Durch die Evaluation stellt sich heraus, dass nicht alle Schwierigkeiten, die bei den Schülern aufgetreten sind, im Vorfeld bedacht werden konnten. Es ist unerlässlich, Erkenntnisse zu möglichen Erschwernissen aus Grundlagen- und Anwendungsforschung zu berücksichtigen. Diese geben zumeist Auskunft darüber, mit welchen Vorstellungen die Schüler an bestimmte Themen herantreten und welche Verständnisschwierigkeiten bestehen. Allerdings ist dies keine Gelingensgarantie für die Unterrichtsmaterialien, auch wenn bereits bewährte Konzepte für deren Entwicklung genutzt werden. Es spielen zu viele nicht vorhersehbare Komponenten eine Rolle. Nicht nur seitens der Schüler, sondern auch hinsichtlich der Lernmaterialgestalter, die eine gewisse Kreativität und Erfahrung mitbringen. Eine Evaluation von Materialien für den Schulunterricht erscheint vor diesem Hintergrund unumgänglich.

Mit diesem Vorgehen können Lernmaterialien beziehungsweise Unterrichtseinheiten entstehen, die nicht nur an das Wissen universitärer Forschung anknüpfen, sondern auch mit Schülern getestet werden. Die Konzeption, Entwicklung und Evaluation von Lernmaterialien steht exemplarisch für das Vorgehen innerhalb der Didaktischen Entwicklungsforschung. Diese Arbeit kann also beispielhaft dafür angesehen werden, wie

Erkenntnisse aus der universitären Forschung, die sich dem theoretisch-technologischen Wissen zuordnen lassen, da dieses innerhalb von Grundlagen und Anwendungsforschung erlangt wurde (hier: unter anderem die Effekte der Cognitive Load Theorie), für die Schul- und Unterrichtspraxis nutzbar gemacht werden können. Auf diesem Wege können auch andere Ergebnisse aus Grundlagen- und Anwendungsforschung in die Praxis übertragen werden. Dabei spielt besonders die Ausrichtung der Evaluation der entwickelten Materialien eine große Rolle. Mit Studien zur Didaktischen Entwicklungsforschung sollte immer das Ziel verfolgt werden, optimierte Materialien oder Konzepte für die Praxis nutzbar zu machen. Der Forschungsschwerpunkt dieser Arbeit hätte ebenso auf der Effektivität der Lernmaterialien liegen können, indem untersucht wird, wie hoch die extrinsische kognitive Belastung bei den Schülern ist, wenn sie die hier entwickelten Lernmaterialien bearbeiten im Vergleich zur Bearbeitung anderer Materialien. Für eine vergleichende Studie müssten die Materialien miteinander vergleichbar sein und dabei sollten nicht nur die Lernziele dieselben sein. Es würde sich daher eher anbieten, vorhandene Materialien mit der Anwendung der Effekte der Cognitive Load Theorie zu verändern, mit dem Ziel, die kognitive Belastung zu verringern. Danach könnte eine vergleichende Studie die abgewandelte Version der Originalform der Materialien gegenüberstellen. Allerdings würde es sich dabei um eine Testung der Effekte handeln, die der Anwendungsforschung zugeordnet werden könnte. Durch die Anwendung Didaktischer Entwicklungsforschung, die in dieser Arbeit zum Ziel hatte, optimierte Lernmaterialien vorzuweisen, kann fortwährend die Unterrichtsqualität verbessert werden, da neueste und in der Forschung bewährte Konzepte für die Praxis zugänglich gemacht werden.

Mit dem Ansatz der Didaktischen Entwicklungsforschung können die Institutionen Hochschule und Schule enger zusammenarbeiten. Die Didaktische Entwicklungsforschung versucht damit einen Weg zu finden, die bestehende Problematik zu umgehen, dass universitäre Forschung und Schule unabhängig voneinander arbeiten. Die gewonnenen Erkenntnisse aus Hochschulforschungen werden nur selten direkt oder aber erst spät in den Schulunterricht übertragen. Die Konzepte, die von den Lehrkräften für ihren Unterricht genutzt werden, haben sie in ihrer Ausbildung und durch Weiter- und Fortbildungen gelernt. Lehrkräfte entwickeln ihren eigenen Unterricht fortwährend weiter, indem sie selbst evaluieren,

ob beispielsweise Aufgaben, Abbildungen oder Texte verstanden werden. Sie versuchen damit ihren Unterricht immer weiter zu verbessern. Dies erfolgt jedoch eher intuitiv und nach Ermessen der jeweiligen Lehrkraft. Die Fülle an Handbüchern, die für Lehrkräfte herausgegeben werden, enthalten zumeist Ratschläge für den Unterricht, sodass sich die Lehrkräfte hier Anregungen oder Hilfe zu fachlichen, fachdidaktischen und pädagogischen Fragen holen können. Jedoch finden sich zumeist keine konkret entwickelten Materialien, die direkt im Unterricht eingesetzt werden können. Und wenn sich solche Materialien finden lassen, sind diese nicht oder nur hinreichend optimiert, da sie nicht evaluiert sind.

Der Einsatz von Lernmaterialien, die nach den Effekten der Cognitive Load Theorie entwickelt und hinsichtlich enthaltener Schwachstellen optimiert worden sind, geht mit einem Umdenken der Lehrkräfte einher. Die Lehrkräfte sind mit ihren alltäglichen Aufgaben beschäftigt und haben zumeist nicht die zeitlichen Ressourcen, sich mit neu entwickelten Materialien auseinanderzusetzen. Außerdem sind Lehrpersonen es oftmals gewohnt, sich einzelne Aufgaben aus einem Aufgabenpool herauszusuchen und in ihren Unterricht einzubauen. Die in dieser Arbeit entstandenen Lernmaterialien können allerdings nicht auf die einzelnen Aufgaben reduziert werden. So könnte der Schwierigkeitsgrad einzelner Aufgaben als zu gering eingeschätzt werden und dadurch würden diese Aufgaben selektiert. Es kann somit als eine Herausforderung von Didaktischer Entwicklungsforschung angesehen werden, dass sich die Lehrkräfte auf die Ergebnisse einlassen und mit diesen arbeiten. Hilfreich könnte dabei die Einbindung von Lehrpersonen in die Entwicklung von Lernmaterialien sein, da sie tagtäglich mit Schülern arbeiten und ihnen somit auch mögliche Schwierigkeiten aus Unterrichtserfahrungen bekannt sind. Jedoch haben Lehrkräfte beziehungsweise Lernmaterialgestalter eine höhere fachliche Expertise als die Schüler, die an das Thema noch erst herangeführt werden. Die Schüler sind daher für das Herausstellen enthaltener Schwachstellen unabdingbar.

Es stellt sich jedoch die Frage, von wem diese Arbeit geleistet werden soll. Das Erstellen von Schulbüchern beziehungsweise Lernheften wird in Deutschland durch Verlage initiiert. Handelt es sich um die erste Fassung eines Schulbuchs wird diese zumeist nach einmaliger Testung veröffentlicht (vgl. Wellenreuther 2010b, S. 144). Allerdings werden die nach der Testung veränderten Schulbuchseiten nicht noch einmal getestet. Wie bereits erwähnt, selektieren danach die Lehrkräfte, welche Aufgaben sich

aus den durch die Schule festgelegten Schulbüchern für ihren Unterricht eignen. In den asiatischen Staaten dagegen werden Schulbücher erst veröffentlicht, wenn sie empirisch überprüft wurden. Sie werden demnach einer strengen Zulassungsprüfung unterzogen. Die entwickelten Schulbuchkapitel werden zunächst von Experten gesichtet und anschließend in mehreren Schleifen in Schulen getestet. Die Kapitel werden nach der Testung erneut überarbeitet und nochmals von Experten gesichtet. Dieser Prozess kann sich teilweise über Jahre hinweg ziehen. (Vgl. ebd.) Damit wird eine Form der Didaktischen Entwicklungsforschung betrieben, die sich auch auf Deutschland übertragen ließe, indem auch hier ein Zulassungsverfahren für Schulbücher eingeführt werden würde. Allerdings muss dabei beachtet werden, dass die Schulbuchzulassung in den asiatischen Staaten China, Japan und Singapur zentral koordiniert wird. In Deutschland obliegen die Zuständigkeiten der einzelnen Bundesländer. (Vgl. ebd.) Wenn eine Antwort auf die Frage gefunden werden soll, wer diese Arbeit zu leisten hat, darf nicht in den einzelnen unabhängig voneinander arbeitenden Bereichen gesucht werden. Es wäre ein leichtes, den Lehrkräften diese Arbeit zuzuschieben und sie für ihren eigenen Unterricht verantwortlich zu machen. Ebenso wäre es nachvollziehbar die Hochschulen mit dieser Arbeit zu beladen. Zwar ist es ratsam innerhalb der Lehrerbildung auf mögliche Konzepte Didaktischer Entwicklungsforschung zu verweisen und beispielsweise Unterrichtsmaterialien erstellen und evaluieren zu lassen, jedoch würde dadurch das Problem nur zeitlich verlagert werden, indem den zukünftigen Lehrkräften diese Aufgabe oktroyiert wird. Stattdessen sollte das Potential Didaktischer Entwicklungsforschung genutzt werden, indem Verlage, Hochschulen und Schulen gemeinsam an der Entwicklung und Evaluation von Schulbüchern arbeiten. Allerdings kann dieser Umbruch erst durch ein Zulassungsverfahren für Schulbücher erzielt werden.

Vor diesem Hintergrund sollen die in dieser Arbeit konzipierten, entwickelten und evaluierten Lernmaterialien nicht als ein weiteres von zahlreichen veröffentlichten Unterrichtsmaterialien verstanden werden, vielmehr soll die Vorgehensweise der Konzeption, Entwicklung und Evaluation der Lernmaterialien exemplarisch für die Umsetzung einer Didaktischen Entwicklungsforschung angesehen werden. Zudem steht die Entwicklung der Lernmaterialien exemplarisch für die Umsetzung der Effekte der Cognitive Load Theorie.

Literaturverzeichnis

- Atkinson, Robert K., Derry, Sharon J., Renkl, Alexander & Wortham, Donald (2000). Learning from examples: Instructional principles from the worked examples research. *Review of Educational Research*, Issue 2, pp. 181-214.
- Ayres, Paul & Sweller, John (2005). The split-attention principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (pp. 135-146). Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Baddeley, Alan (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, Issue 11, pp. 417-423.
- Baddeley, Alan (2001). *Human Memory. Theory and Practise* (Revised Edition). Hove: Psychology Press.
- Baddeley, Alan (2003). Working memory: looking back an forward. *Nature Reviews Neuroscience*, Issue 10, pp. 829-839. doi: 10.1038/nrn1201.
- Baddeley, Alan (2007). *Working memory, thought, and action*. Oxford: University Press (= Oxford University Series 45).
- Baddeley, Alan (2009). Working memory. In A. Baddeley, M. W. Eysenck & M. C. Anderson (Eds.), *Memory* (pp. 41-68). Hove and New York: Psychology Press.
- Baddeley, Alan, Eysenck, Michael W. & Anderson, Michael C. (Eds.) (2009). *Memory*. Hove and New York: Psychology Press.
- Birbaumer, Niels & Schmidt, Robert F. (2007). Lernen und Gedächtnis. In R. F. Schmidt & F. Lang (Hrsg.), *Physiologie des Menschen. Mit Pathophysiologie* (30. Auflage) (S. 224-238). Heidelberg: Springer Medizin.

- Blankertz, Herwig (1969). *Theorien und Modelle der Didaktik* (2. Auflage). München: Juventa (= Grundfragen der Erziehungswissenschaft 6).
- Bortz, Jürgen & Döring, Nicola (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler* (4. Auflage). Heidelberg: Springer Medizin.
- Bühner, Markus & Ziegler, Matthias (2009). *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. München: Pearson.
- Chandler, Paul & Sweller, John (1991). Cognitive load theory and the format of instruction. *Cognition and Instruction*, Issue 4, pp. 293-332.
- Chandler, Paul & Sweller, John (1992). The split-attention effect as a faktor in the design of instruction. *British Journal of Educational Psychology*, Issue 2, pp. 233-246.
- Cooper, Graham, Tindall-Ford, Sharon, Chandler, Paul & Sweller, John (2001). Learning by imagining. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, Issue 1, pp. 68-82.
- Demtröder, Wolfgang (2013). *Experimentalphysik 2. Elektrizität und Optik* (6. Auflage). Berlin und Heidelberg: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-29944-5.
- Dörr, Günter, Seel, Norbert M. & Strittmatter, Peter (1986). Mentale Modelle: Alter Wein in neuen Schläuchen? *Unterrichtswissenschaft*, Heft 2, S. 169-189.
- Drehsing, Thorsten & Pehl, Thorsten (2015). *Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse. Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende* (6. Auflage). Marburg: Eigenverlag. URL: <http://www.audiotranskription.de/praxisbuch> (letzter Zugriff: 23. Januar 2018).
- Duit, Reinders (2002). Alltagsvorstellungen und Physik lernen. In E. Kircher & W. B. Schneider (Hrsg.), *Physikdidaktik in der Praxis* (S. 1-26). Berlin, Heidelberg und New York: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-56386-7.

- Duit, Reinders & Mikelskis-Seifert, Silke (2010). *Piko-Brief Nr.5. Kontextorientierter Physikunterricht*.
URL: <http://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/abteilungen/didaktik-der-physik/piko/pikobriefe032010.pdf> (letzter Zugriff: 23. Januar 2018).
- Edelmann, Walter & Wittmann, Simone (2012). *Lernpsychologie* (7. Auflage). Weinheim und Basel: Beltz.
- Einsiedler, Wolfgang (Hrsg.) (2011). *Unterrichtsentwicklung und Didaktische Entwicklungsforschung*. Bad Heilbrunn: Julius Klinkhardt.
- Einsiedler, Wolfgang (2011). Was ist Didaktische Entwicklungsforschung? In W. Einsiedler (Hrsg.), *Unterrichtsentwicklung und Didaktische Entwicklungsforschung* (S.41-70). Bad Heilbrunn: Julius Klinkhardt.
- Eysel, Ulf (2007). Sehen und Augenbewegungen. In R. F. Schmidt & F. Lang (Hrsg.), *Physiologie des Menschen. Mit Pathophysiologie* (30. Auflage) (S. 378-420). Heidelberg: Springer Medizin.
- Fließbach, Torsten (2012). *Elektrodynamik. Lehrbuch zur Theoretischen Physik II* (6. Auflage). Berlin und Heidelberg: Springer. doi: 10.1007/978-3-8274-3036-6.
- Früh, Werner (2015). *Inhaltsanalyse. Theorie und Praxis*. (8. Auflage). Konstanz und München: UVK Verlagsgesellschaft.
- Gerthsen, Christian, Kneser, Hans O. & Vogel, Helmut (1989). *Physik. Ein Lehrbuch* (16. Auflage). Berlin, Heidelberg, New York und Tokyo: Springer.
- Ginns, Paul, Chandler, Paul & Sweller, John (2003). When imagining information is effective. *Contemporary Educational Psychology*, Issue 2, pp. 229-251.
- Glöckel, Hans (2003). *Vom Unterricht. Lehrbuch der Allgemeinen Didaktik* (4. Auflage). Bad Heilbrunn/ Obb.: Julius Klinkhardt.
- Götz, Thomas (Hrsg.) (2011). *Emotion, Motivation und selbstreguliertes Lernen*. Paderborn: Ferdinand Schöningh (= StandardWissen Lehramt 3481).

- Gräsel, Cornelia (2011). Die Kooperation von Forschung und Lehrer/-innen bei der Realisierung didaktischer Innovationen. In W. Einsiedler (Hrsg.), *Unterrichtsentwicklung und Didaktische Entwicklungsfor-*
schung (S. 88-101). Bad Heilbrunn: Julius Klinkhardt.
- Große, Cornelia S. (2005). *Lernen mit Multiplen Lösungswegen*. Münster: Waxmann (= Pädagogische Psychologie und Entwicklungspsychologie 47).
- Gruber, Hans (1999). *Erfahrung als Grundlage kompetenten Handelns*. Bern: Hans Huber.
- Hasselhorn, Marcus & Gold, Andreas (2009). *Pädagogische Psychologie. Erfolgreiches Lernen und Lehren* (2. Auflage). Stuttgart: Kohlhammer (= Standards Psychologie).
- Hattie, John (2013). *Lernen sichtbar machen*. Deutsche Ausgabe besorgt von Wolfgang Beywl und Klaus Zierer. Baltmannsweiler: Schneider.
- Heimann, Paul (1962). Didaktik als Theorie und Lehre. *Die deutsche Schule*, Heft 9, S. 407-427.
- Heursen, Gerd (2001). Didaktik, allgemeine. In D. Lenzen (Hrsg.) unter Mitarbeit von F. Rost, *Pädagogische Grundbegriffe* (6. Auflage, Band 1) (S. 307-317). Stuttgart: Ernst Klett (= rowohlt's enzyklopädie 55487).
- Hoffmann, Lore, Häußler, Peter & Lehrke, Manfred (1998). *Die IPN-Interessenstudie Physik*. Kiel: IPN.
- Hron, Aemilian (1982). Interview. In G. L. Huber & H. Mandl (Hrsg.), *Verbale Daten. Eine Einführung in die Grundlagen und Methoden der Erhebung und Auswertung* (S. 119-140). Weinheim und Basel: Beltz.
- Huber, Günter L. & Mandl, Heinz (Hrsg.) (1982). *Verbale Daten. Eine Einführung in die Grundlagen und Methoden der Erhebung und Auswertung*. Weinheim und Basel: Beltz.
- Immoos, Franz (2009). *Farben. Wahrnehmung. Assoziation. Psychoenergetik*. URL: <http://gestaltung.wilhelm-ostwald-schule.de/wp-content/uploads/2010/04/bedeutung-der-farben.pdf> und auch <http://franz.immoos.eu/farbenergie/grun.html> (letzter Zugriff: 23. Januar 2018).

- Kahlert, Joachim & Zierer, Klaus (2011). Didaktische Entwicklungsforschung aus Sicht der pragmatischen Entwicklungsarbeit. In W. Einsiedler (Hrsg.), *Unterrichtsentwicklung und Didaktische Entwicklungsforschung* (S. 71-87). Bad Heilbrunn: Julius Klinkhardt.
- Kalyuga, Slava, Ayres, Paul, Chandler, Paul & Sweller, John (2003). The expertise reversal effect. *Educational Psychologist*, Issue 1, pp. 23-31.
- Kalyuga, Slava, Chandler, Paul & Sweller, John (2001). Learner experience and efficiency of instructional guidance. *Educational Psychology*, Issue 1, pp. 5-23. doi: 10.1080/01443410020019803.
- Kantorowicz, Victor (2005). *Auf der Suche nach Einsteins Feldtheorie. Neue Antworten auf offene Fragen der Relativitätstheorie*. Norderstedt: Books on Demand.
- Kircher, Ernst & Schneider, Werner B. (Hrsg.) (2002). *Physikdidaktik in der Praxis*. Berlin, Heidelberg und New York: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-56386-7.
- Kirschhock, Eva-Maria & Munser-Kiefer, Meike (2011). Didaktische Entwicklungsforschung am Beispiel Lesestrategien – Entwicklung und empirische Überprüfung eines Lesestrategie-Trainings. In W. Einsiedler (Hrsg.), *Unterrichtsentwicklung und Didaktische Entwicklungsforschung* (S. 125-143). Bad Heilbrunn: Julius Klinkhardt.
- Klafki, Wolfgang (1958). Didaktische Analyse als Kern der Unterrichtsvorbereitung. *Die deutsche Schule*, Heft 10, S. 450-471.
- Klafki, Wolfgang (1963). Das Problem der Didaktik. Zweiter Teil: Methodologische und bildungstheoretische Voraussetzungen der Didaktik und die Struktur des didaktischen Feldes. In W. Klafki (1964), *Studien zur Bildungstheorie und Didaktik* (3./4. Auflage) (S. 82-125). Weinheim: Julius Beltz.
- Klafki, Wolfgang (1964). *Studien zur Bildungstheorie und Didaktik* (3./4. Auflage). Weinheim: Julius Beltz.
- Klafki, Wolfgang (1980). Zur Unterrichtsplanung im Sinne kritisch-konstruktiver Didaktik. In W. Klafki (2007), *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik. Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-*

- konstruktive Didaktik* (6. Auflage) (S. 251-284). Weinheim und Basel: Beltz.
- Klafki, Wolfgang (1985). Grundlinien kritisch-konstruktiver Didaktik. In W. Klafki (2007), *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik. Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik* (6. Auflage) (S. 83-138). Weinheim und Basel: Beltz.
- Klafki, Wolfgang (1986). Die Bedeutung der klassischen Bildungstheorien für ein zeitgemäßes Konzept allgemeiner Bildung. In W. Klafki (2007), *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik. Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik* (6. Auflage) (S. 15-41). Weinheim und Basel: Beltz.
- Klafki, Wolfgang (1991). Grundzüge eines neuen Allgemeinbildungskonzepts. Im Zentrum: Epochaltypische Schlüsselprobleme. In W. Klafki (2007), *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik. Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik* (6. Auflage) (S. 43-81). Weinheim und Basel: Beltz.
- Klafki, Wolfgang (1994). Zum Verhältnis von Allgemeiner Didaktik und Fachdidaktik – Fünf Thesen. In M. A. Meyer & W. Plöger (Hrsg.), *Allgemeine Didaktik, Fachdidaktik und Fachunterricht* (S. 42-64). Weinheim und Basel: Beltz (= Studien zur Schulpädagogik und Didaktik 10).
- Klafki, Wolfgang (2007). *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik. Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik* (6. Auflage). Weinheim und Basel: Beltz.
- Krapp, Andreas & Weidemann, Bernd (Hrsg.) (2001). *Pädagogische Psychologie* (4. Auflage). Weinheim: BeltzPVU.
- Kron, Friedrich W. (2008). *Grundwissen Didaktik* (5. Auflage). München & Basel: Ernst Reinhardt.
- Langer, Inghard, Schulz von Thun, Friedemann & Tausch, Reinhard (2006). *Sich verständlich ausdrücken* (8. Auflage). München & Basel: Ernst Reinhardt.

- Leahy, Wayne & Sweller, John (2005). Interactions among the imagination, expertise reversal, and element interactivity effects. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, Issue 4, pp. 266-276.
- Lechte, Mari-Annikka (2008). *Sinnbezüge, Interesse und Physik. Eine empirische Untersuchung zum Erleben von Physik aus Sicht von Schülerinnen und Schülern*. Opladen und Farmington Hills: Barbara Budrich (= Studien zur Bildungsgangforschung 23).
- Lenzen, Dieter (Hrsg.) unter Mitarbeit von Friedrich Rost (2001). *Pädagogische Grundbegriffe* (6. Auflage, Band 1). Stuttgart: Ernst Klett (= rowohlt's enzyklopädie 55487).
- Low, Renae & Sweller, John (2005). The modality principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (pp. 147-158). Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Mayer, Richard E. (2001). *Multimedia Learning*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mayer, Richard E. (2005). Principles for reducing extraneous processing in multimedia learning: Coherence, signaling, redundancy, spatial contiguity, and temporal contiguity principles. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (pp. 183-200). Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Mayer, Richard E. (Ed.) (2005). *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Mayer, Richard E. & Chandler, Paul (2001). When Learning is just a click away: Does simple user interaction foster deeper understanding of multimedia messages? *Journal of Educational Psychology*, Issue 2, pp. 390-397.
- Mayer, Richard E. & Moreno, Roxana (1998). A split-attention effect in multimedia learning: Evidence for dual processing systems in working memory. *Journal of Educational Psychology*, Issue 2, pp. 312-320.
- Mazur, James E. (2006). *Lernen und Verhalten* (6. Auflage). München: Pearson.

- Meschede, Dieter (Hrsg.) (2015). *Gerthsen Physik* (25. Auflage). Berlin und Heidelberg: Springer. doi: 10.1007/978-3-662-45977-5.
- Meyer, Meinert A. & Plöger, Wilfried (Hrsg.) (1994). *Allgemeine Didaktik, Fachdidaktik und Fachunterricht*. Weinheim und Basel: Beltz (= Studien zur Schulpädagogik und Didaktik 10).
- Mikelskis, Helmut F. (Hrsg.) (2006). *Physik-Didaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II*. Berlin: Cornelsen Scriptor.
- Möhring, Wiebke & Schlütz, Daniela (Hrsg.) (2013). *Handbuch standardisierte Erhebungsverfahren in der Kommunikationswissenschaft*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Müller, Rainer (2006). Kontextorientierung und Alltagsbezug. In H. F. Mikelskis (Hrsg.), *Physik-Didaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (S. 102-119). Berlin: Cornelsen Scriptor.
- Niedersächsisches Kultusministerium (2007). *Kerncurriculum für das Gymnasium Schuljahrgänge 5 - 10. Naturwissenschaften*.
URL: http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/kc_hs_nws_07_nib.pdf (letzter Zugriff: 23. Januar 2018).
- Niedersächsisches Kultusministerium (2015a). *Kerncurriculum für das Gymnasium Schuljahrgänge 5 - 10. Mathematik*.
URL: http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/ma_gym_si_kc_druck.pdf (letzter Zugriff: 23. Januar 2018).
- Niedersächsisches Kultusministerium (2015b). *Kerncurriculum für das Gymnasium Schuljahrgänge 5 - 10. Naturwissenschaften*.
URL: http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/nw_gym_si_kc_druck.pdf (letzter Zugriff: 23. Januar 2018).
- Niegemann, Helmut M., Domagk, Steffi, Hessel, Silvia, Hein, Alexandra, Hupfer, Matthias & Zobel, Annett (2008). *Kompendium multimediales Lernen*. Berlin und Heidelberg: Springer.
- Palm, Günther (1988). Assoziatives Gedächtnis und Gedächtnistheorie. *Spektrum der Wissenschaft*, Heft 6, S. 54-64.
- Pollock, Edwina, Chandler, Paul & Sweller, John (2002). Assimilating complex information. *Learning and Instruction*, Issue 1, pp. 61-86.

- Purves, William K., Sadava, David, Orians, Gordon H. & Heller, H. Craig (2006). *Biologie* (7. Auflage). Deutsche Übersetzung herausgegeben von Jürgen Markl. München: Elsevier Spektrum Akademischer Verlag.
- Quilici, Jill R. & Mayer, Richard E. (1996). Role of examples in how students learn to categorize statistic word problems. *Journal of Educational Psychology*, Issue 1, pp. 144-161.
- Reich, Kersten (1977). *Theorien der Allgemeinen Didaktik. Zu den Grundlinien didaktischer Wissenschaftsentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland und in der Deutschen Demokratischen Republik*. Stuttgart: Ernst Klett.
- Renkl, Alexander (2005). The worked-out examples principles in multimedia learning. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (pp. 229-245). Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Renkl, Alexander, Gruber, Hans, Weber, Sandra, Lerche, Thomas & Schweizer, Karl (2003). Cognitive Load beim Lernen aus Lösungsbeispielen. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, Heft 2, S. 93-101. doi: 10.1024//1010-0652.17.2.93.
- Rey, Günter D. (2008). *Lernen mit Multimedia. Die Gestaltung interaktiver Animationen*. Dissertationsschrift, Universität Trier.
URL: http://ubt.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2008/450/pdf/Lernen_mit_Multimedia.pdf (letzter Zugriff: 23. Januar 2018).
- Rey, Günter D. (2009). *E-Learning. Theorien, Gestaltungsempfehlungen und Forschung*. Bern: Hans Huber.
- Rössler, Patrick & Geise, Stephanie (2013). Standardisierte Inhaltsanalyse: Grundprinzipien, Einsatz und Anwendung. In W. Möhring & D. Schlütz (Hrsg.), *Handbuch standardisierte Erhebungsverfahren in der Kommunikationswissenschaft* (S. 269-287). Wiesbaden: Springer Fachmedien. doi: 10.1007/978-3-531-18776-1_15.
- Schmidt, Robert F. & Lang, Florian (Hrsg.) (2007). *Physiologie des Menschen. Mit Pathophysiologie* (30. Auflage). Heidelberg: Springer Medizin.

- Schnotz, Wolfgang & Kürschner, Christian (2007). A reconsideration of cognitive load theory. *Educational Psychology Review*, Issue 19, pp. 469-508. doi: 10.1007/s10648-007-9053-4.
- Schulz, Wolfgang (1964). Schule als Gegenstand der Pädagogik. *Die deutsche Schule*, Heft 6, S. 325-347.
- Schulz, Wolfgang (1969). Umriß einer didaktischen Theorie der Schule. *Die deutsche Schule*, Heft 2, S. 61-72.
- Schulz von Thun, Friedemann (1976). Die Aneignung von Kenntnissen im Unterricht durch verständliche Lehrtexte. *Unterrichtswissenschaft*, Heft 2, S. 101-113.
- Seel, Norbert M. (1991). Lernumgebungen und institutionell-organisatorische Bedingungen des Instruktionsdesigns. *Unterrichtswissenschaft*, Heft 4, S. 350-364.
- Seel, Norbert M. (1999). Instruktionsdesign: Modelle und Anwendungsgebiete. *Unterrichtswissenschaft*, Heft 1, S. 2-11.
- Seel, Norbert M. (2003). *Psychologie des Lernens* (2. Auflage). München und Basel: Ernst Reinhardt UTB.
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2005). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss*.
URL: https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf (letzter Zugriff: 23. Januar 2018).
- Steiner, Gerhard (2001). Lernen und Wissenserwerb. In A. Krapp & B. Weidemann (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie* (4. Auflage) (S. 137-205). Weinheim: BeltzPVU.
- Stolz, Werner (2005). *Starthilfe Physik. Ein Leitfaden für Studienanfänger der Naturwissenschaften, des Ingenieurwesens und der Medizin* (4. Auflage). Stuttgart, Leipzig und Wiesbaden: Teubner. doi: 10.1007/978-3-322-80171-5.
- Sweller, John (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, Issue 2, pp. 257-285.

- Sweller, John (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, Issue 4, pp. 295-312.
- Sweller, John (2004). Instructional design consequences of an analogy between evolution by natural selection and human cognitive architecture. *Instructional Science*, Issue 1-2, pp. 9-31.
- Sweller, John (2005). Implications of cognitive load theory for multimedia learning. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (pp. 19-30). Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Sweller, John & Chandler, Paul (1994). Why some material is difficult to learn. *Cognition and Instruction*, Issue 3, pp. 185-233.
- Sweller, John, van Merriënboer, Jeroen J. G. & Paas, Fred G. W. C. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review*, Issue 3, pp. 251-296.
- Tuovinen, Juhani E. (2000). Optimising student cognitive load in computer education. *ACSE'00: Proceedings of the Australasian conference on Computing education*, pp. 235-241. doi: 10.1145/359369.359405.
- Wellenreuther, Martin (2010a). *Lehren und Lernen – aber wie? Empirisch-experimentelle Forschungen zum Lehren und Lernen im Unterricht* (5. Auflage). Baltmannsweiler: Schneider (= Grundlagen der Schulpädagogik 50).
- Wellenreuther, Martin (2010b). Schulbücher – eine Lernhilfe für Schüler und Lehrer? Zur Professionalisierung der Schulbuchentwicklung. *Schulverwaltung NRW*, Heft 5, S. 144-146.
- Wellenreuther, Martin (2011). *Forschungsbasierte Schulpädagogik. Anleitungen zur Nutzung empirischer Forschung für die Schulpraxis* (2. Auflage). Baltmannsweiler: Schneider.
- Wodzinsky, Rita (2002). Mädchen im Physikunterricht. In E. Kircher & W. B. Schneider (Hrsg.), *Physikdidaktik in der Praxis* (S. 27-46). Berlin, Heidelberg und New York: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-56386-7.
- Woolfolk, Anita (2008). *Pädagogische Psychologie* (10. Auflage, bearbeitet und übersetzt von Ute Schönplflug). München: Pearson.

- Zierer, Klaus (2006). Was bedeutet „Schule als Lebensraum“? Sechs Thesen zu einem „pädagogischen Programm“. *Pädagogische Rundschau*, Heft 1, S. 49-60.
- Zierer, Klaus (2008). Schule ist Lebenszeit! Überlegungen zur Zeitlichkeit der Erziehung. *Vierteljahrsschrift für wissenschaftliche Pädagogik*, Heft 4, S. 474-486.
- Zierer, Klaus (2010). *Alles prüfen! Das Beste behalten! Zur Eklektik in Lehrbüchern der Didaktik und des Instructional Design*. Baltmannsweiler: Schneider.
- Zierer, Klaus (2014). *Hattie für gestresste Lehrer. Kernbotschaften und Handlungsempfehlungen aus John Hatties „Visible Learning“ und „Visible Learning for Teachers“*. Baltmannsweiler: Schneider.
- Zierer, Klaus & Seel, Norbert M. (2012). General Didactics and Instructional Design: eyes like twins A transatlantic dialogue about similarities and differences, about the past and the future of two sciences of learning and teaching. In *SpringerPlus 2012 1:15*. doi: 10.1186/2193-1801-1-15.
- Zierer, Klaus, Speck, Karsten & Moschner, Barbara (2013). *Methoden erziehungswissenschaftlicher Forschung*. München: Ernst Reinhardt.

Anhang zur Vorstudie

Lernmaterialversion 1

Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 2: Ausbreitung und Reflexion von Licht

Ausbreitung und Reflexion von Licht

Tim wacht mitten in der Nacht auf und möchte sich etwas zu trinken holen. In seinem Zimmer ist es völlig dunkel und seine Nachtlampe ist kaputt. Er hat aber vor sich eine Taschenlampe auf seinem Nachtschisch stehen, mit der er den Weg zur Tür ganz ein bisschen leuchten kann.

Licht breitet sich immer in Form eines Lichtbündels geradlinig aus.

Das kann man besonders gut beobachten, wenn die Lichtstrahlen der Sonne durch Blätter eines Waldes fallen.

Auch das Licht der Taschenlampe breitet sich geradlinig aus. Alles, was Tim nicht mit dem Lichtstrahl anleuchtet, kann er nicht erkennen oder gar nicht sehen. Die Gegenstände, die von der Taschenlampe angestrahlt werden, werfen das Licht zurück. Dieses Zurückwerfen des Lichts nennt man **Reflexion**. Aus dem Grund kann Tim zum Beispiel seine Zimmertür sehen.

Zeichne ein, welchen Weg das Licht von der Taschenlampe zur Tür nimmt und von dort zurück zu Tim.




Unsere Augen können als Lichtempfänger bezeichnet werden. Wir können unsere Umwelt sehen, weil die Gegenstände das Licht reflektieren und das Licht von den Gegenständen auf unsere Augen trifft.

Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 1: Der Aufbau des menschlichen Auges

Tim ist 12 Jahre alt und geht in die 6. Klasse. Seitdem er einen neuen Sitzplatz in der hintersten Reihe des Klassenzimmers hat, plagen ihn nach dem Unterricht starke Kopfschmerzen. Seine Lehrerin rät ihm, einen Augenarzt aufzusuchen, weil sie beobachtet hat, dass er ständig mit zusammengekniffenen Augen im Unterricht sitzt.

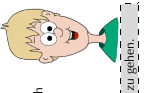
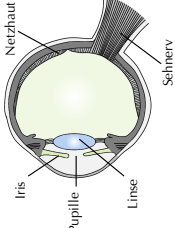
Stelle eine Vermutung auf, warum die Lehrerin Tim rat, zum Augenarzt zu gehen.

Endlich zu Hause angekommen, steht Tim vor dem Spiegel und beobachtet seine Augen. Seiner Meinung nach sehen seine Augen aus wie immer. Er überlegt, wie das Sehen überhaupt funktioniert: Ganz klar, zum Sehen brauchen wir unsere **Augen**. **Licht** muss auch vorhanden sein, weil wir im Dunkeln nicht sehen können.

Der Aufbau des menschlichen Auges

Tim kann bei dem Blick in den Spiegel seine grün gefärbte **Iris** erkennen. Außerdem sieht er seine **Pupille**, die eigentlich nur ein Loch in der Iris ist. Durch die Pupille fällt Licht in das Auge ein. Auch die **Leiterhaut**, die den weißen Teil des Auges bildet, kann Tim sehen. Das Auge wird auch als **Augapfel** bezeichnet.

Beschrifte die Abbildung mit den Begriffen Iris, Pupille, Leiterhaut.

Damit das Sehen funktioniert, sind besonders die **Iris** und die **Pupille**, die **Linse** und die **Netzhaut** erforderlich. Die Linse und die Netzhaut sind nicht sichtbar von außen. In dem Querschnitt des Augapfels ist die Pupille als Loch in der Iris deutlich zu erkennen.

Hinter der Pupille befindet sich die Linse, die dafür sorgt, dass wir Gegenstände scharf und deutlich sehen können.

Die Netzhaut ist dafür zuständig, das gesehene Bild wahrzunehmen und die Informationen über den **Sehnerv** an das Gehirn weiterzuleiten.

Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 3: Der Weg des Lichts durch das Auge



Der Weg des Lichts durch das Auge

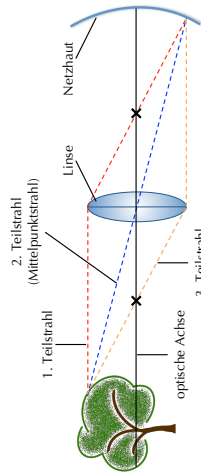
Tim hat einen Termin beim Augenarzt. Im Wartezimmer schnappt er sich eine Zeitschrift. Dort liest er: „*Ohne die Verrechnung unseres Gehirns würde für uns die Welt auf dem Kopf stehen!*“. Darin wird in schwieriger Fachsprache erklärt, dass unsere Augen die Umwelt umgekehrt wahrnehmen und unser Gehirn die wahrgenommenen Bilder dann wieder umdreht. Tim versteht aber überhaupt nichts. Vielleicht kannst du Tim helfen.

Wenn wir einen Baum betrachten, dann reflektiert der Baum das Licht der Sonne. Dieses reflektierte Licht trifft auf die unsere Augen.

1. Zeichne den Weg des Lichts ein. *Tipps: Schau dir noch einmal den Weg des Lichts von Tims Taschenlampe an.*
2. Zeichne ein, wo sich die **Linse** und die **Netzhaut** im Querschnitt des Auges befinden und beschrifte diese.



Auf der Netzhaut wird ein umgekehrtes Bild des Baumes abgebildet. Dafür ist die Linse verantwortlich. Von jedem Punkt des Baumes werden die Lichtstrahlen der Sonne reflektiert. Dabei teilt sich jeder Lichtstrahl in drei Teilstrahlen auf:



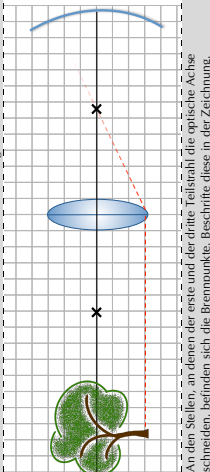
- Was wird auf der Netzhaut an dem Punkt abgebildet, an dem sich die drei Teilstrahlen treffen?
- ein Teil des Baumstamms
 - ein Teil der Baumkrone

Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 3: Der Weg des Lichts durch das Auge



Da von der Sonne Lichtstrahlen auf den Baum treffen und reflektiert werden, gehen von jedem Punkt des Baumes die 3 Teilstrahlen aus. Beispielsweise auch von dem untersten Teil des Baumstammes:

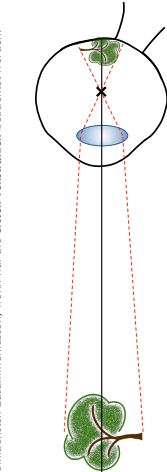
Vervollständige die Zeichnung, indem du die 3 Teilstrahlen, ausgehend vom dem Baumstamm, einzeln zeichnest. Als Hilfe ist der 1. Teilstrahl angedeutet.



An den Stellen, an denen der erste und der dritte Teilstrahl die optische Achse schneiden, befinden sich die **Netzhaut** und die **Linse**. Beschrifte diese in der Zeichnung.

Zusammenfassung

Auf der Netzhaut entsteht ein umgekehrtes Bild des Baumes. Dies lässt sich am einfachsten zusammenfassen, wenn nur die **ersten Teilstrahlen** betrachtet werden:



Die Netzhaut leitet die Informationen über den Seheren an das Gehirn weiter. Das Gehirn verarbeitet die eingehenden Informationen so, dass wir den Baum wieder richtig herum wahrnehmen.

Beschrifte die Abbildung mit möglichst vielen Begriffen.

Welcher Teil des menschlichen Auges ist dafür verantwortlich, das vorerst ein umgekehrtes Bild entsteht?

- Pupille
- Netzhaut
- Linse
- Leerkhaut

Warum wird der Baum trotzdem „richtig herum“ wahrgenommen?

<div style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"> Lernmaterialien zum Thema Optik Kapitel 4: Wie entsteht ein scharfes Bild? </div> <p>Endlich wird Tim aus dem Wartezimmer in das Behandlungszimmer des Augenarztes geführt. Tim erzählt von seinen Kopfschmerzen, seitdem er seinen neuen Sitzplatz im hinteren Teil des Klassenzimmers hat. Der Augenarzt möchte daraufhin mit Tim einen Sehtest machen. Dazu muss sich Tim ein Auge zuhalten und von einem Plakat Zeichen ablesen. Diese Zeichen sind schwarze Ringe, die jeweils an einer Seite eine Öffnung haben. Tim muss die Seite nennen, an der sich die Öffnung befindet. Mit jeder Reihe werden die Ringe kleiner. Tim kann die unterste Reihe weder mit dem rechten noch mit dem linken Auge komplett richtig vorlesen.</p> <p>Tim kann die unterste Reihe kaum erkennen. Das bedeutet, dass er ...</p> <p><input type="checkbox"/> Gegenstände in der ferne schlecht erkennen kann.</p> <p><input type="checkbox"/> Gegenstände in der Nähe schlecht erkennen kann.</p> <p>Der Augenarzt bietet Tim, eine Brille aufzusetzen. Damit kann Tim auch die unterste Reihe viel besser erkennen. Tim ist überrascht und der Augenarzt erklärt ihm, dass er eine Sehschwäche hat. Genauer gesagt ist der Abstand zwischen Tims Linse und Netzhaut zu groß, sodass kein scharfes Bild entstehen kann.</p>	<div style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"> Lernmaterialien zum Thema Optik Kapitel 4: Wie entsteht ein scharfes Bild? </div> <p>Der Augenarzt hat Tim gesagt, dass der Abstand zwischen seiner Linse und seiner Netzhaut zu groß ist. Welche der folgenden Aussagen ist korrekt?</p> <p><input type="radio"/> Tims Augapfel ist zu kurz.</p> <p><input type="radio"/> Tims Augapfel ist zu lang.</p> <p>Welche Position hat Tims Netzhaut in der vorigen Abbildung? ... (a/b)</p> <p>Personen, die Gegenstände in der Nähe schlecht erkennen können, haben einen zu kurzen Augapfel und sind weltsichtig.</p> <p>Personen, die Gegenstände in der Ferne schlecht erkennen können, haben einen zu langen Augapfel und sind kurzsichtig.</p> <p>Welche Sehschwäche hat Tim? Ist er kurz- oder weltsichtig?</p> <p>Tim ist ...</p> <p>Es kann jedoch auch ein scharfes Bild auf Netzhaut entstehen, wenn der Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut größer ist als bei einem normalsichtigen Auge: Zeichne in beide Abbildungen die drei Teilstrahlen ein, ausgehend von dem Punkt an der Baumkrone. Beachte, dass sich die Teilstrahlen in einem Punkt auf der Netzhaut treffen müssen. Zeichne auch die Brennpunkte ein.</p> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> </div> <p>Tipps: Beginne mit dem 2. Teilstrahl (Mittelpunktstrahl). An dem Punkt, an dem der Mittelpunktstrahl auf die Netzhaut trifft, müssen die 3 Teilstrahlen zusammenfallen.</p> <p>Außer der Position der Netzhaut verändert sich die Position von ...</p> <p><input type="radio"/> der Linse.</p> <p><input type="radio"/> den Brennpunkten.</p> <p><input type="radio"/> dem Baum.</p>
<div style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"> Lernmaterialien zum Thema Optik Kapitel 4: Wie entsteht ein scharfes Bild? </div> <p>Tim kam die unterste Reihe kaum erkennen. Das bedeutet, dass er ...</p> <p><input type="checkbox"/> Gegenstände in der ferne schlecht erkennen kann.</p> <p><input type="checkbox"/> Gegenstände in der Nähe schlecht erkennen kann.</p> <p>Der Augenarzt bietet Tim, eine Brille aufzusetzen. Damit kann Tim auch die unterste Reihe viel besser erkennen. Tim ist überrascht und der Augenarzt erklärt ihm, dass er eine Sehschwäche hat. Genauer gesagt ist der Abstand zwischen Tims Linse und Netzhaut zu groß, sodass kein scharfes Bild entstehen kann.</p>	<div style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"> Lernmaterialien zum Thema Optik Kapitel 4: Wie entsteht ein scharfes Bild? </div> <p>Der Augenarzt hat Tim gesagt, dass der Abstand zwischen seiner Linse und seiner Netzhaut zu groß ist. Welche der folgenden Aussagen ist korrekt?</p> <p><input type="radio"/> Tims Augapfel ist zu kurz.</p> <p><input type="radio"/> Tims Augapfel ist zu lang.</p> <p>Welche Position hat Tims Netzhaut in der vorigen Abbildung? ... (a/b)</p> <p>Personen, die Gegenstände in der Nähe schlecht erkennen können, haben einen zu kurzen Augapfel und sind weltsichtig.</p> <p>Personen, die Gegenstände in der Ferne schlecht erkennen können, haben einen zu langen Augapfel und sind kurzsichtig.</p> <p>Welche Sehschwäche hat Tim? Ist er kurz- oder weltsichtig?</p> <p>Tim ist ...</p> <p>Es kann jedoch auch ein scharfes Bild auf Netzhaut entstehen, wenn der Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut größer ist als bei einem normalsichtigen Auge: Zeichne in beide Abbildungen die drei Teilstrahlen ein, ausgehend von dem Punkt an der Baumkrone. Beachte, dass sich die Teilstrahlen in einem Punkt auf der Netzhaut treffen müssen. Zeichne auch die Brennpunkte ein.</p> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> </div> <p>Tipps: Beginne mit dem 2. Teilstrahl (Mittelpunktstrahl). An dem Punkt, an dem der Mittelpunktstrahl auf die Netzhaut trifft, müssen die 3 Teilstrahlen zusammenfallen.</p> <p>Außer der Position der Netzhaut verändert sich die Position von ...</p> <p><input type="radio"/> der Linse.</p> <p><input type="radio"/> den Brennpunkten.</p> <p><input type="radio"/> dem Baum.</p>

Sehfehler korrigieren

Um ein scharfes Bild auf der Netzhaut zu erzeugen, obwohl der Abstand zwischen der Linse und Netzhaut zu groß ist, müssen sich die Brennpunkte verschieben. Die Linse des Auges kann die Position der Brennpunkte jedoch nicht verändern. Das kann nur erreicht werden, indem eine zusätzliche Linse vor das Auge gebracht wird.


Es gibt zwei unterschiedliche Linsenarten: Die **Sammellinse** und die **Zerstreuungslinse**.

Sammellinse

Eine Sammellinse sammelt die Lichtstrahlen in einem Punkt (Brennpunkt). Du kennst die Sammellinse bereits, da die Linse des Auges auch eine Sammellinse ist. Eine zusätzliche Sammellinse vor dem Auge sorgt dafür, dass Gegenstände in der Nähe scharf gesehen werden können. Mit einer Sammellinse wird **Weitsichtigkeit** korrigiert.

Zerstreuungslinse

Eine Zerstreuungslinse zerstreut die Lichtstrahlen. Eine zusätzliche Zerstreuungslinse vor dem Auge sorgt dafür, dass Gegenstände in der Ferne scharf gesehen werden können. Mit einer Zerstreuungslinse wird **Kurzsichtigkeit** korrigiert.

 Für die Linse ist es wichtig, dass sie die richtige Größe hat. Ein falsches Maß führt zu Beschwerden. Der Augenarzt sagt ihm, dass seine Kopfschmerzen daher kommen, weil er Gegenstände in der (Nähe/ferne) schlecht erkennen kann. Sein Augapfel ist zu (kurz/lang), womit der Abstand zwischen seiner Linse und seiner Netzhaut zu (groß/klein) ist. Tim ist also (kurzsichtig/weitsichtig). Seine Sehschwäche kann durch eine Brille mit (Sammellinsen/Zerstreuungslinsen) korrigiert werden.

Tim's neue Brille hilft ihm, (sein Heiß/die Tafel) in der (Nähe/ferne) wieder deutlich zu sehen und seine Kopfschmerzen sind auch weg.

Wissenstest

<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">Lernmaterialien zum Thema Optik Test</p> </div> <p>1. Der Aufbau des menschlichen Auges</p> <p>a) Beschrifte die Abbildung.</p> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> </div> <p>b) Welcher Bestandteil des menschlichen Auges sorgt dafür, dass vorerst ein umgekehrtes Bild entsteht?</p> <p>c) Wann sehen wir Objekte unsere Umwelt wie in umgekehrt?</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">Lernmaterialien zum Thema Optik Test</p> </div> <p>3. Der Weg des Lichts durch das Auge.</p> <p>a) Vervollständige die Zeichnung, indem du den 1. und 3. Teilstrahl einzeichnet.</p> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> </div> <p>b) Zeichne die Brennpunkte ein und beschrifte sie.</p> <p>c) Die drei Teilstrahlen treffen sich auf der Netzhaut in einem Punkt. Welche Aussage trifft für diesen Punkt zu?</p> <p><input type="radio"/> Hier müssen sich die Strahlen treffen, weil sich hier der Brennpunkt befindet.</p> <p><input type="radio"/> Nur wenn sich die Strahlen in einem Punkt treffen, kann hier ein scharfes Abbild des obersten Teils des Stoppschildes entstehen.</p> <p><input type="radio"/> Nur wenn sich die Strahlen in einem Punkt treffen, kann hier ein scharfes Abbild des untersten Teils der Eisenstange entstehen.</p> <p><input type="radio"/> Es ist völlig egal, ob sich die Teilstrahlen in einem Punkt treffen.</p>
<p>2. Tim läuft nach dem Fußballtraining nach Hause. Es ist bereits dunkel, sodass die Strahlenarmen schon an sind. Auf dem Heimweg kommt er an einer Kreuzung vorbei und sieht schon von weitem, dass es sich um eine Kreuzung mit einem Stoppschild handelt.</p> <p>Zeichne den Weg des Lichts ein.</p> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> </div>	<p>4. Tims ältere Schwester Lisa macht auch einen Semest beim Augenarzt. Es stellt sich heraus, dass sie ebenfalls eine Sehschwäche hat. Im Gegensatz zu Tim ist Lisa weitsichtig.</p> <p>Fülle den Lückentext aus.</p> <p>Lisa kann Gegenstände in der (Näheferne) schlecht erkennen. Ihr Augenmaß ist zu (lang/kurz), womit der Abstand zwischen ihrer Linse und ihrer Netzhaut zu (groß/klein) ist. Ihre Weitsichtigkeit kann durch eine Brille mit (Sammellinsen/Zerstreuungslinsen) korrigiert werden.</p>

Interviewleitfaden

Interviewleitfaden Kapitel 1-3

1. Wie findest du das Lernmaterial?
 - a. Was hat dir gut gefallen? Warum?
 - b. Was hat dir weniger / gar nicht gefallen? Warum?
 - c. Wie findest du die Geschichte über Tim?
 - i. Dass er im Unterricht Kopfschmerzen hat und zum Augenarzt gehen soll.
 - ii. Dass er im Wartezimmer in einer Zeitschrift liest, dass die Welt für uns auf dem Kopf stehen würde, wenn unser Gehirn die Informationen nicht verrechnen würde.
2. Verständlichkeit
 - a. Was hast du besonders gut / leicht verstanden? Warum?
 - b. Was hast du gar nicht / nur schwer verstanden?
 - c. Abbildung Querschnitt Auge (S. 1):
Wie hast du es empfunden, dass die Erklärungen direkt neben der Abbildung stehen?
 - d. Grüner Kasten zur Ausbreitung von Licht (S. 2):
Wie hast du es empfunden, dass die Abbildung direkt neben dem Text steht?
 - e. Wie findest du die Zusammenfassung im grünen Kasten (S. 4)?
3. Informationsdichte
 - a. Hast du dir beim Bearbeiten Fragen gestellt, die durch das Material nicht beantwortet wurden?
→ Fehlte dir irgendwo eine Erklärung?
 - b. Gibt es irgendwo zu viele Erklärungen, die dich eigentlich nur verwirrt haben?
4. Aufgabenschwierigkeit
 - a. Welche Aufgaben fielen dir leicht? Warum?
 - b. Welche Aufgaben fielen dir schwer? Warum?
Hast du sie trotzdem gelöst? Wie?
 - c. Aufgabe zum Zeichnen der Teilstrahlen (S. 3):
Hast du dir den Tipp zum Weg des Lichts von Tims Taschenlampe geholfen? Hast du dich daran orientiert?
 - d. Aufgabe zum Zeichnen der Teilstrahlen (S. 4):
 - i. Hast du dich dabei an der Abbildung zuvor (S. 3) orientiert?
 - ii. Hat dir der Tipp, dass du mit dem 2. Teilstrahl beginnen sollst, geholfen?
 - e. Aufgabe im grünen Kasten (S. 4):
Wie kamst du damit klar? (Evtl. als Hilfe: Weil du ja nicht wusstest, welche Begriffe du verwenden solltest)


Interviewleitfaden Kapitel 4 & 5

1. Wie findest du das Lernmaterial?
 - a. Was hat dir gut gefallen? Warum?
 - b. Was hat dir weniger / gar nicht gefallen? Warum?
 - c. Wie findest du die Geschichte über Tim?
 - i. Dass er beim Augenarzt einen Sehstest macht und sich herausstellt, dass er eine Sehschwäche hat?
 2. Verständlichkeit
 - a. Was hast du besonders gut / leicht verstanden? Warum?
 - b. Was hast du gar nicht / nur schwer verstanden?
 3. Informationsdichte
 - a. Hast du dir beim Bearbeiten Fragen gestellt, die durch das Material nicht beantwortet wurden?
→ Fehlte dir irgendwo eine Erklärung?
 - b. Gibt es irgendwo zu viele Erklärungen, die verwirrend sein könnten?
 4. Aufgabenschwierigkeit
 - a. Welche Aufgaben fielen dir leicht? Warum?
 - b. Welche Aufgaben fielen dir schwer? Warum?
Hast du sie trotzdem gelöst? Wie?
 - c. Aufgabe zum Zeichnen der Teilstrahlen (S. 6, unterste Zeichnung):
Ist es dir leicht oder schwer gefallen, die 3 Teilstrahlen einzuzeichnen?
 - i. Woran hast du dich dabei orientiert?
 - ii. Ist der Tipp in der Sprechblase hilfreich?
 - iii. Ist dir sofort aufgefallen, dass sich die Brennpunkte verschieben?
 - d. Lückentext (S. 7):
 - i. Hast du beim Bearbeiten des Lückentextes zurückgeblättert?
 - ii. Hat dir die Bearbeitung des Lückentextes beim Verstehen des Gesamtzusammenhangs geholfen?
- ### Interviewleitfaden abschließend
1. Wie findest du die Geschichte über Tim?
 2. Was bedeuten die grauen Kästen?
 3. Was bedeuten die grünen Kästen?
 4. Kannst du Unterschiede zwischen diesen Materialien und den sonstigen aus der Schule / deinem Unterricht feststellen?
→ Gefälen dir diese Materialien besser oder schlechter?
 5. Möchtest du jetzt mehr über das Thema Optik erfahren? (z.B. mehr über das Auge oder mehr über Brillen)
 6. Möchtest du abschließend noch etwas über die Lernmaterialien sagen?

Anhang zur Hauptstudie I

Lernmaterialversion 2

Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 2: Ausbreitung und Reflexion von Licht



Ausbreitung und Reflexion von Licht


Tim wacht mitten in der Nacht auf und möchte sich etwas zu trinken holen. In seinem Zimmer ist es völlig dunkel und seine Nachtlampe ist kaputt. Er hat aber vor sich eine Taschenlampe auf seinem Nachtschisch stehen, mit der er den Weg zur Tür ganz ein bisschen leuchten kann.

Licht breitet sich immer in Form eines Lichtbündels geradlinig aus.

Das kann man besonders gut beobachten, wenn die Lichtstrahlen der Sonne durch Blätter eines Waldes fallen.


Auch das Licht der Taschenlampe breitet sich geradlinig aus. Alles, was Tim nicht mit dem Lichtstrahl anleuchtet, kann er nicht erkennen oder gar nicht sehen. Die Gegenstände, die von der Taschenlampe angestrahlt werden, werfen das Licht zurück. Dieses Zurückwerfen des Lichts nennt man **Reflexion**. Aus dem Grund kann Tim zum Beispiel seine Zimmertür sehen.


Zeichne ein, welchen Weg das Licht von der Taschenlampe zur Tür nimmt und von dort zurück zu Tim.



Unsere Augen können als Lichtempfänger bezeichnet werden. Wir können unsere Umwelt sehen, weil die Gegenstände das Licht reflektieren und das Licht von den Gegenständen auf unsere Augen trifft.

Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 1: Der Aufbau des menschlichen Auges





Tim ist 12 Jahre alt und geht in die 6. Klasse. Seitdem er einen neuen Sitzplatz in der hintersten Reihe des Klassenzimmers hat, plagen ihn nach dem Unterricht starke Kopfschmerzen. Seine Lehrerin rät ihm, einen Augenarzt aufzusuchen, weil sie beobachtet hat, dass er ständig mit zusammengekniffenen Augen im Unterricht sitzt.

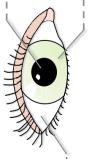
Stelle eine Vermutung auf, warum die Lehrerin Tim rat, zum Augenarzt zu gehen.

Endlich zu Hause angekommen, steht Tim vor dem Spiegel und beobachtet seine Augen. Seiner Meinung nach sehen seine Augen aus wie immer. Er überlegt, wie das Sehen überhaupt funktioniert: Ganz klar, zum Sehen brauchen wir unsere Augen. Licht muss auch vorhanden sein, weil wir im Dunkeln nicht sehen können.

Der Aufbau des menschlichen Auges

Tim kann bei dem Blick in den Spiegel seine grün gefärbte Iris erkennen. Außerdem sieht er seine Pupille, die eigentlich nur ein Loch in der Iris ist. Durch die Pupille fällt Licht in das Auge ein. Auch die Lederhaut, die den weißen Teil des Auges bildet, kann Tim sehen. Das Auge wird auch als **Augapfel** bezeichnet.

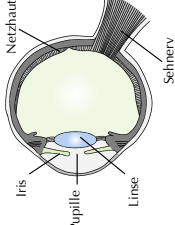
Beschrifte die Abbildung mit den Begriffen Iris, Pupille, Lederhaut.



Damit das Sehen funktioniert, sind besonders die Iris und die Pupille, die Linse und die Netzhaut erforderlich. Die Linse und die Netzhaut sind nicht sichtbar von außen. In dem Querschnitt des Augapfels ist die Pupille als Loch in der Iris deutlich zu erkennen.

Hinter der Pupille befindet sich die Linse, die dafür sorgt, dass wir Gegenstände scharf und deutlich sehen können.

Die Netzhaut ist dafür zuständig, das gesehene Bild wahrzunehmen und die Informationen über den Sehnerv an das Gehirn weiterzuleiten.



Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 3: Der Weg des Lichts durch das Auge

Der Weg des Lichts durch das Auge

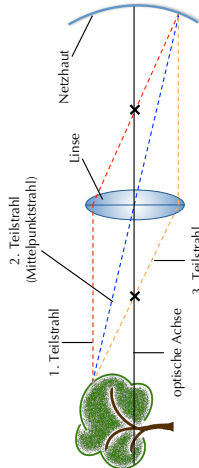
Tim hat einen Termin beim Augenarzt. Im Wartezimmer schnappt er sich eine Zeitschrift. Dort liest er: „*Ohne die Verrechnung unseres Gehirns würde für uns die Welt auf dem Kopf stehen!*“. Darin wird in schwieriger Fachsprache erklärt, dass unsere Augen die Umwelt umgekehrt wahrnehmen und unser Gehirn die wahrgenommenen Bilder dann wieder umdreht. Tim versteht aber überhaupt nichts. Vielleicht kannst du Tim helfen.

Wenn wir einen Baum betrachten, dann reflektiert der Baum das Licht der Sonne. Dieses reflektierte Licht trifft auf die unsere Augen.

1. Zeichne den Weg des Lichts ein. *Tipps: Schau dir noch einmal den Weg des Lichts von Tims Taschenlampe an.*
2. Zeichne ein, wo sich die **Linse** und die **Netzhaut** im Querschnitt des Auges befinden und beschrifte diese.



Auf der Netzhaut wird ein umgekehrtes Bild des Baumes abgebildet. Dafür ist die Linse verantwortlich. Von jedem Punkt des Baumes werden die Lichtstrahlen der Sonne reflektiert. Dabei teilt sich jeder Lichtstrahl in drei Teilstrahlen auf:



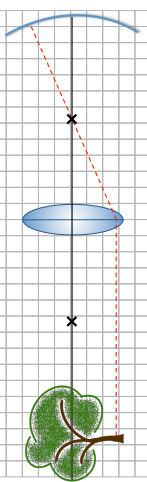
Was wird auf der Netzhaut an dem Punkt abgebildet, an dem sich die drei Teilstrahlen treffen?
 ein Teil des Baumstamms ein Teil der Baumkrone

Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 3: Der Weg des Lichts durch das Auge

Da von der Sonne Lichtstrahlen auf den Baum treffen und reflektiert werden, gehen von jedem Punkt des Baumes die 3 Teilstrahlen aus. Beispielsweise auch von dem untersten Teil des Baumstammes:

Vervollständige die Zeichnung, indem du die 3 Teilstrahlen, ausgehend von dem Baumstamm, einzeichnet. Als Hilfe ist der 1. Teilstrahl angedeutet.

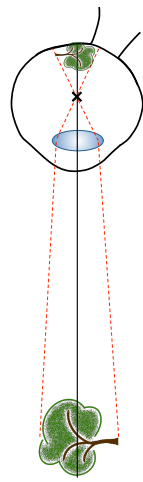
Tipps: Beginne mit dem 2. Teilstrahl (Mittelpunktstrahl). Achte darauf, dass sich alle drei Teilstrahlen in einem Punkt auf der Netzhaut treffen.



An den Stellen, an denen der erste und der zweite Teilstrahl die optische Achse schneiden, beschrifte sie mit der Bezeichnung „Brennpunkt“ und „Zentrum“.

Zusammenfassung

Auf der Netzhaut entsteht ein umgekehrtes Bild des Baumes. Dies lässt sich am einfachsten zusammensetzen, wenn nur die **ersten Teilstrahlen** betrachtet werden:




Die Netzhaut leitet die Informationen über den Sehnerv an das Gehirn weiter. Das Gehirn verrechnet die eingehenden Informationen so, dass wir den Baum wieder richtig herum wahrnehmen.

Beschrifte die Abbildung mit möglichst vielen Begriffen.

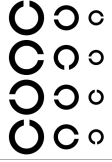
Auf welchem Bestandteil des menschlichen Auges entsteht das umgekehrte Bild?

- Pupille
- Netzhaut
- Linse
- Lederhaut
- Welche(r) Teil des menschlichen Auges ist dafür verantwortlich, dass vorerst ein umgekehrtes Bild entsteht?
- Pupille
- Netzhaut
- Linse
- Lederhaut
- Warum wird der Baum trotzdem „richtig herum“ wahrgenommen?



Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 4: Wie entsteht ein scharfes Bild?

Endlich wird Tim aus dem Wartezimmer in das Behandlungszimmer des Augenarztes gerufen. Tim erzählt von seinen Kopfschmerzen, seitdem er seinen neuen Sitzplatz im hinteren Teil des Klassentraumes hat. Der Augenarzt möchte daraufhin mit Tim einen Sehtest machen. Dazu muss sich Tim ein Auge zuhalten und von einem Plakat Zeichen ablesen. Diese Zeichen sind schwarze Ringe, die jeweils an einer Seite eine Öffnung haben. Tim muss die Seite nennen, an der sich die Öffnung befindet. Mit jeder Reihe werden die Ringe kleiner. Tim kann die unterste Reihe weder mit dem rechten noch mit dem linken Auge komplett richtig vorlesen.



Tim kann die unterste Reihe kaum erkennen. Das bedeutet, dass er ...

Gegenstände in der **ferne** schlecht erkennen kann.

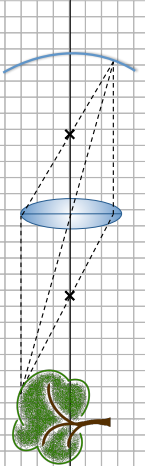
Gegenstände in der **Nähe** schlecht erkennen kann.

Der Augenarzt bietet Tim, eine Brille aufzusetzen. Damit kann Tim auch die unterste Reihe viel besser erkennen. Tim ist überrascht und der Augenarzt erklärt ihm, dass er eine Sehschwäche hat. Genauer gesagt ist der Abstand zwischen Tims Linse und Netzhaut zu groß, sodass kein scharfes Bild entstehen kann.

Wie entsteht ein scharfes Bild?

Damit wir einen Baum scharf sehen können, müssen sich alle drei Teilstrahlen in einem Punkt auf der Netzhaut treffen.


Markiere den Punkt in der Zeichnung, an dem sich die drei Teilstrahlen auf der Netzhaut treffen.



Verändere die Position der Netzhaut, indem du sie ...

a) ca. 2 Kästchen weiter links zeichnest.
Treffen sich die Teilstrahlen auf der Netzhaut in einem Punkt? ... (groß/klein) ist weil der Abstand zwischen Linse und Netzhaut zu ... (groß/klein) ist.
Der Augapfel ist hier zu ... (kurz/lang).

b) ca. 2 Kästchen weiter rechts zeichnest. Verlängere außerdem die drei Teilstrahlen, sodass sie auf die Netzhaut treffen.
Treffen sich die Teilstrahlen auf der Netzhaut in einem Punkt? ... (groß/klein) ist weil der Abstand zwischen Linse und Netzhaut zu ... (groß/klein) ist.
Der Augapfel ist hier zu ... (kurz/lang).



Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 4: Wie entsteht ein scharfes Bild?

Der Augenarzt hat Tim gesagt, dass der Abstand zwischen seiner Linse und seiner Netzhaut zu groß ist. Welche der folgenden Aussagen ist korrekt?

Tims Augapfel ist zu lang.

Tims Augapfel ist zu kurz.

Welche Position hat Tims Netzhaut in der vorigen Abbildung? ... (a/b)

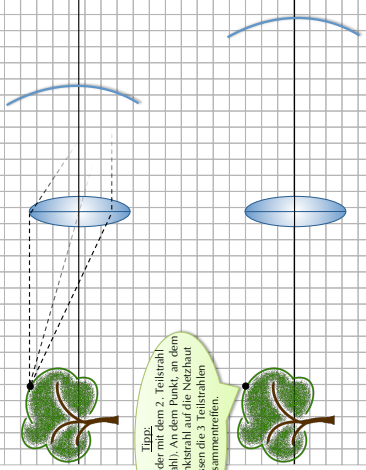
Personen, die Gegenstände in der Nähe schlecht erkennen können, haben einen zu kurzen Augapfel und sind **weltsichtig**.

Personen, die Gegenstände in der Ferne schlecht erkennen können, haben einen zu langen Augapfel und sind **kurzsichtig**.

Welche Sehschwäche hat Tim? Ist er kurz- oder weitsichtig?

Tim ist ...

Es kann jedoch auch ein scharfes Bild auf Netzhaut entstehen, wenn der Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut größer ist als bei einem normalsichtigen Auge: Zeichne in beide Abbildungen die drei Teilstrahlen ein, ausgehend von dem Punkt an der Baumkrone. Beachte, dass sich die Teilstrahlen in einem Punkt auf der Netzhaut treffen müssen. Zeichne auch die Brempunkte ein.



Tipps: Beginne wieder mit dem 2. Teilstrahl (Mittelpunktstrahl). An dem Punkt, an dem der Mittelpunktstrahl auf die Netzhaut trifft, müssen die 3 Teilstrahlen zusammenfallen.

Außer der Position der Netzhaut verändert sich die Position von ...

der Linse.

den Brempunkten.

dem Baum.

Sehfehler korrigieren

Um ein scharfes Bild auf der Netzhaut zu erzeugen, obwohl der Abstand zwischen der Linse und Netzhaut zu groß ist, müssen sich die Brennpunkte verschieben. Die Linse des Auges kann die Position der Brennpunkte jedoch nicht verändern. Das kann nur erreicht werden, indem eine zusätzliche Linse vor das Auge gebracht wird.

Es gibt zwei unterschiedliche Linsenarten: Die **Sammellinse** und die **Zerstreuungslinse**.

Sammellinse

Eine Sammellinse sammelt die Lichtstrahlen in einem Punkt (Brennpunkt). Du kennst die Sammellinse bereits, da die Linse des Auges auch eine Sammellinse ist. Eine zusätzliche Sammellinse vor dem Auge sorgt dafür, dass Gegenstände in der Nähe scharf gesehen werden können. Mit einer Sammellinse wird **Weitsichtigkeit** korrigiert.

Zerstreuungslinse

Eine Zerstreuungslinse zerstreut die Lichtstrahlen. Eine zusätzliche Zerstreuungslinse vor dem Auge sorgt dafür, dass Gegenstände in der Ferne scharf gesehen werden können. Mit einer Zerstreuungslinse wird **Kurzsichtigkeit** korrigiert.

Die Linse des Auges ist eine Sammellinse. Wenn das Auge zu nah ist, wird das Bild vor der Netzhaut in der Kammer des Auges erzeugt. Das ist ein Sehfehler, den man als **Kurzsichtigkeit** bezeichnet. Der Augenzustand, bei dem das Bild hinter der Netzhaut entsteht, ist die **Weitsichtigkeit**. Der Augenzustand, bei dem das Bild genau auf der Netzhaut entsteht, ist die **Normalsichtigkeit**. Tim hat in der Schule Kopfschmerzen. Der Augenarzt sagt ihm, dass seine Kopfschmerzen daher kommen, weil er Gegenstände in der _____ (Nähe/ferne) schlecht erkennen kann. Sein Augapfel ist zu _____ (kurz/lang), womit der Abstand zwischen seiner Linse und seiner Netzhaut zu _____ (groß/klein) ist. Tim ist also _____ (kurzsichtig/weitsichtig). Seine Sehschwäche kann durch eine Brille mit _____ (Sammellinsen/Zerstreuungslinsen) korrigiert werden.

Tim's neue Brille hilft ihm _____ (sein Heiß/die Tafel) in der _____ (Nähe/ferne) wieder deutlich zu sehen und seine Kopfschmerzen sind auch weg.

Kürzel zu Lernmaterialversion 2

Kürzel	Kurzbeschreibung	Kürzel	Kurzbeschreibung
1T1	Tim im Unterricht	3I4a	Erste Teilstrahlen für Gesamte Abbildung
1A1	Vermutung aufstellen	3I4b	Abbildung zur Bildentstehung
1T2	Tim vor dem Spiegel	3I4c	Weiterleitung ans Gehirn
1I1	Iris, Pupille, Lederhaut	3A4	möglichst viele Begriffe
1A2	Äußeres Auge beschriften	3A5a	auf Netzhaut entsteht Bild
1I2	Querschnitt des Auges (gesamt)	3A5b	Linse ist verantwortlich
1I2a	Text: Aufbau inneres Auge	3A5c	Warum richtig herum?
1I2b	Abbildung Querschnitt des Auges		
2T1	Tim mit der Taschenlampe	4T1	Tim beim Augenarzt
2I1	Geradlinige Lichtausbreitung (gesamter Kasten)	4A1	Ergebnis Sehtest: Ferne
2I1a	Text: Geradlinige Ausbreitung	4I1	Abstand Linse – Netzhaut ist zu groß
2I1b	Abbildung: Lichtstrahlen im Wald	4I2	Treffpunkt auf der Netzhaut
2I2	Reflexion von Licht	4A2a	Treffpunkt markieren
2A1	Weg des Lichts zeichnen (Lampe)	4A2b	Beide Netzhäute zeichnen
2I3	Augen als Lichtempfänger	4A2c	Lücken ausfüllen
3T1	Tim im Wartezimmer	4A3	Augapfel ist zu lang / b
3I1	Weg des Lichts der Sonne	4I3	weitsichtig & kurzsichtig
3A1a	Weg des Lichts zeichnen (Sonne)	4A4	kurzsichtig
3A1b	Linse und Netzhaut beschriften	4A5a	3 Teilstrahlen zeichnen (2x)
3I2a	Lichtstrahl = 3 Teilstrahlen	4A5b	Brennpunkte einzeichnen
3I2b	Abbildung: Konstruktion der 3 Teilstrahlen	4A5Tipp	Beginne mit dem 2. Teilstrahl
3A2	ein Teil der Baumkrone	4A6	Brennpunkte verschieben sich
3I3	Überleitung: unterster Ausgangspunkt	5I1	Brennpunkte müssen sich verschieben
3A3a	Zeichnen der 3 Teilstrahlen	5I2	Linsenformen (gesamt)
3A3Tipp	Beginne mit dem 2. Teilstrahl	5I2a	Sammellinse
3A3b	Brennpunkte beschriften	5I2b	Zerstreuungslinse
3I4	Zusammenfassung (gesamter Kasten)	5A1	Lückentext
		5A1Bild	Abbildung im Lückentext

Reliabilitätstest

Auswertung der Aufgaben in den Lernmaterialien

Dargestellt: Die von den Probanden gelösten Aufgaben (1=korrekt, 2=falsch, 0=fehlt)

Proband Kürzel	Codierer 1		Codierer 2													
	1	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1A1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1A2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
2A1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1
3A1a	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1
3A1b	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	2	1	1	1	1	1
3A2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1
3A3a	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1
3A3b	1	1	1	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3A4	1	1	1	2	2	1	2	0	2	0	0	2	2	2	2	1
3A5a	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1
3A5b	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1
3A5c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
4A1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4A2a	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
4A2b	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2	1	1	1	1	1
4A2c	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1
4A3	1	1	1	1	1	2	2	2	2	0	0	2	2	1	1	1
4A4	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1
4A5a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4A5b	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2	2	1	1	1	1
4A6	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1
5A1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1



		Codierer 1			Σ
		korrekt (=1)	falsch (=2)	fehlt (=0)	
Codierer 2	korrekt (=1)	205*	0**	0**	205
	falsch (=2)	9**	45*	3**	57
	fehlt (=0)	1**	0**	23*	24
	Σ	215	45	26	286

* Übereinstimmungen zwischen beiden Codierern

** Fälle, die nicht übereinstimmen

Auswertung der Aufgaben im Wissenstest

Dargestellt: Die von den Probanden gelösten Aufgaben (1=korrekt, 2=falsch, 0=fehlt)

Proband Aufgabe	Codierer 1		Codierer 2																							
	1	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13											
1a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	0	0	1	1	0	2	0	2	
1b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2
1c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3b	1	1	1	1	1	1	0	0	2	2	0	0	1	2	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
3c	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1



		Codierer 1			Σ
		korrekt (=1)	falsch (=2)	fehlt (=0)	
Codierer 2	korrekt (=1)	77*	0**	0**	77
	falsch (=2)	2**	18*	2**	22
	fehlt (=0)	0**	0**	5*	5
	Σ	79	18	7	104

* Übereinstimmungen zwischen beiden Codierern

** Fälle, die nicht übereinstimmen

Auswertung der Transkripte

Dargestellt: Die von den Probanden als schwierig empfundenen Abschnitte

Transkript Kürzel	Codierer 1		Codierer 2													Σ												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII															
formal			x x	x							x	x			3	2												
1A1	x x		x									x x			3	2												
1T2				x											1	0												
1I2b					x						x x				1	2												
2I1a								x							0	1												
2I1b						x x									1	1												
2A1		x x	x x	x x		x x	x x					x		x	6	6												
3T1							x x								1	2												
3A1a		x x	x			x x	x x							x x	5	4												
3A1b			x		x										1	1												
3I2a							x								0	1												
3I2b												x x			1	1												
3A2		x x					x								1	2												
3A3a			x x			x x	x x	x x		x	x x				6	5												
3A3Tipp	x x						x x								2	2												
3A3b			x				x	x				x x			3	4												
3I4b												x			0	1												
3I4c							x								1	0												
3A4		x x	x	x x	x	x x	x x	x x	x	x				x x	10	6												
3A5a						x				x x	x x			x x	3	4												
3A5b						x x	x			x x	x			x x	5	3												
3A5c						x	x		x			x			3	1												
4T1		x x	x x												2	2												
4A2b			x x								x				4	3												
4A2c							x			x x	x x				4	2												
4I2														x	0	1												
4A4						x									1	0												
4A5a		x x	x x				x x	x				x x	x		6	4												
4A5b		x x						x							3	5												
4A5Tipp			x x							x					1	1												
4A6							x							x x	2	1												
5I2						x x						x x			2	2												
5A1															0	1												
5A1Bild												x			1	0												
Σ	2	2	7	8	11	7	6	7	4	4	10	10	11	8	2	4	2	1	5	3	12	9	4	3	7	7	83	73



		Codierer 1		Σ
		kann bestehen bleiben	sollte verbessert werden	
Codierer 2	kann bestehen bleiben	613*	30**	643
	sollte verbessert werden	19**	53*	72
Σ		632	38	715

* Übereinstimmungen zwischen beiden Codierern

** Fälle, die nicht übereinstimmen

Anhang zur Hauptstudie II

Lernmaterialversion 3

Lernmaterialien zum Thema Optik

Kapitel 1: Der Aufbau des menschlichen Auges

Tim ist 12 Jahre alt und geht in die 6. Klasse. Seitdem er einen neuen Sitzplatz in der hintersten Reihe des Klassenzimmers hat, plagen ihn nach dem Unterricht starke Kopfschmerzen. Seine Lehrerin rät ihm, einen Augenarzt aufzusuchen, weil sie beobachtet hat, dass er ständig mit zusammengekniffenen Augen im Unterricht sitzt.

1) Stelle eine Vermutung auf, warum die Lehrerin Tim rat, zum Augenarzt zu gehen.

2) Beschrifte die Abbildung mit den Begriffen **Iris**, **Pupille**, **Lederhaut**.

1 Der Aufbau des menschlichen Auges

Tim kann bei dem Blick in den Spiegel seine grün gefärbte **Iris** erkennen. Außerdem sieht er seine **Pupille**, die eigentlich nur ein Loch in der Iris ist. Durch die Pupille fällt Licht in das Auge ein. Auch die **Lederhaut**, die den weißen Teil des Auges bildet, kann Tim sehen. Das Auge wird auch als **Augapfel** bezeichnet.

Damit das Sehen funktioniert, sind besonders die **Iris** und die **Pupille**, die **Linse** und die **Netzhaut** erforderlich. Die **Linse** und die **Netzhaut** sind von außen nicht sichtbar. In dem Querschnitt des **Augapfels** ist die **Pupille** als Loch in der **Iris** deutlich zu erkennen.

Hinter der **Pupille** befindet sich die **Linse**, die dafür sorgt, dass wir Gegenstände scharf und deutlich sehen können.

Die **Netzhaut** ist dafür zuständig, das gesehene Bild wahrzunehmen und die Informationen über den **Sehnerv** an das Gehirn weiterzuleiten. Der **Sehnerv** ist ebenfalls von außen nicht sichtbar.

Lernmaterialien zum Thema Optik

Kapitel 2: Ausbreitung und Reflexion von Licht

Tim wacht mitten in der Nacht auf und möchte sich etwas zu trinken holen. In seinem Zimmer ist es völlig dunkel und seine Nachtschlampe ist kaputt. Er hat aber vorsorglich eine Taschenlampe auf seinem Nachtschisch stehen, mit der er den Weg zur Tür ganz einfach finden kann.

2 Ausbreitung und Reflexion von Licht

Licht breitet sich immer in Form eines Lichtbündels **geradlinig** aus.


Das kann man besonders gut beobachten, wenn die Lichtstrahlen der Sonne durch die Bäume eines Waldes fallen.

Auch das Licht der Taschenlampe breitet sich geradlinig aus. Alles, was Tim nicht mit dem Lichtstrahl anleuchtet, kann er nicht sehen oder nicht sehen. Die Gegenstände, die von der Taschenlampe angestrahlt werden, werden das Licht zurück. Dieses Zurückwerfen des Lichts nennt man **Reflexion**. Aus dem Grund kann Tim zum Beispiel seine Zimmertür sehen.

Zeichne ein, welchen Weg das Licht von der Taschenlampe zur Tür nimmt und von dort zurück zu Tim, damit er seine Tür sehen kann.

Tipp: Zeichne beide Wege jeweils als Pfeile ein.

Unsere Augen können als Lichteempfänger bezeichnet werden. Wir können unsere Umwelt sehen, weil die Gegenstände das Licht reflektieren und das Licht von den Gegenständen auf unsere Augen trifft.






Kapitel 3: Der Weg des Lichts durch das Auge

Lernmaterialien zum Thema Optik

Taschler braucht Tim keine Taschenlampe, weil das Licht der Sonne zum Sehen ausreicht. Die Sonnenstrahlen treffen auf die Gegenstände in unserer Umwelt und werden von diesen reflektiert. Wenn wir einen Baum betrachten, dann reflektiert der Baum das Licht der Sonne. Dieses reflektierte Licht trifft auf unsere Augen.

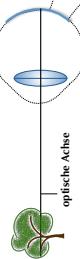
1a) Zeichne den Weg des Lichts ein.
Tipps: Schau dir noch einmal den Weg des Lichts von Tims Taschenlampe an.

b) Beschrifte die **Linse** und die **Netzhaut** im Querschnitt des Auges.

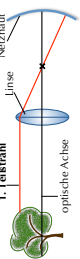




3 Der Weg des Lichts durch das Auge

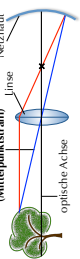
Auf der **Netzhaut** unserer Augen entsteht ein Abbild des Baumes. Dafür ist die **Linse** verantwortlich. Von jedem Punkt des Baumes werden die Lichtstrahlen der Sonne reflektiert. Dabei teilt sich jeder reflektierte Lichtstrahl in 3 **Teilstrahlen** auf:



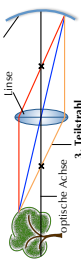
optische Achse



1. Teilstrahl



2. Teilstrahl (Mittelpunktstrahl)



3. Teilstrahl

Durch die Mitte der Pupille und der Linse verläuft die **optische Achse** und trifft auf die Mitte der Netzhaut.

a) Beschrifte die **Linse** und die **Netzhaut**.


Der **1. Teilstrahl** schneidet die optische Achse zwischen der Linse und der Netzhaut. Hier befindet sich der **Brennpunkt** des 1. Teilstrahls.

b) Beschrifte den **Brennpunkt** des 1. Teilstrahls.

Der **2. Teilstrahl** wird auch als **Mittelpunktstrahl** bezeichnet, weil er durch die Mitte der Linse verläuft.

Der **3. Teilstrahl** schneidet die optische Achse zwischen der Linse und dem betrachteten Gegenstand. Hier liegt der **Brennpunkt** des 3. Teilstrahls.

c) Beschrifte den **Brennpunkt** des 3. Teilstrahls.




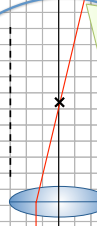
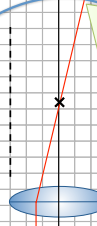
Kapitel 3: Der Weg des Lichts durch das Auge

Lernmaterialien zum Thema Optik

3a) Vervollständige die Zeichnung, indem du die 3 Teilstrahlen, ausgehend von der mittleren Baumkrone, einzeichnest. Als Hilfe ist der 1. Teilstrahl eingezeichnet. Orientiere dich beim Zeichnen an dem grünen Kreis an der vorderen Seite und beginne die **Tipps** in den Gedankenblöcken.

Tipps:




Beginne mit dem 3. Teilstrahl (Mittelpunktstrahl). Beschrifte ihn in einem Punkt auf der optischen Achse.
 Beschrifte die **Netzhaut** treffen.

Es ist einfacher den 3. Teilstrahl nach hinten zu zeichnen. Beginne also bei dem Punkt auf der Netzhaut.

b) Beschrifte die Brennpunkte in der Zeichnung.

4a) Vervollständige die Zeichnung, indem du die 3 Teilstrahlen, ausgehend von dem Baumstamm, einzeichnest.


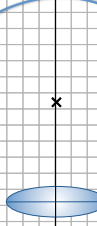
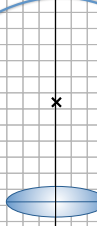




Tipps:

Beschrifte, dass die Teilstrahlen jetzt gespiegelt sind. Der 1. Teilstrahl befindet sich nun unten.

b) Markiere den Punkt in der Zeichnung, an dem sich die 3 Teilstrahlen auf der Netzhaut treffen.

5) Zeichne die 3 Teilstrahlen von einem beliebigen Punkt des Baumes ausgehend.

Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 4: Wie entsteht ein scharfes Bild?

Personen, die Gegenstände in der Nähe schlecht erkennen können, haben einen zu **kurzen** Augapfel und sind **weitsichtig**.
Personen, die Gegenstände in der Ferne schlecht erkennen können, haben einen zu **langen** Augapfel und sind **kurzsichtig**.
5) Welche Sehschwäche hat Tim? Ist er kurz- oder weitsichtig?

Tim ist _____

Es kann trotzdem ein scharfes Bild auf der Netzhaut entstehen, wenn der Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut größer ist als bei einem normalsichtigen Auge:
6a) Zeichne in beide Abbildungen die 3 Teilstrahlen ein, ausgehend von dem vorgegebenen Punkt an der Baumkrone. Beachte, dass sich die Teilstrahlen in einem Punkt auf der Netzhaut treffen müssen.

b) Zeichne auch die Brennpunkte ein.

Tip 1:
Beginne wieder mit dem 2. Teilstrahl (Mittelpunktstrahl). An dem Punkt, an dem der Mittelpunktstrahl auf die Netzhaut trifft, müssen die 3 Teilstrahlen zusammentreffen.

Tip 2:
Zeichne den 3. Teilstrahl wieder rückwärts.

7) Außer der Position der Netzhaut verändert sich die Position von ...
 der Linse.
 den Brennpunkten.
 dem Baum.

Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 4: Wie entsteht ein scharfes Bild?

Tim hat einen Termin beim Augenarzt. Er erzählt von seinen Kopfschmerzen, seitdem er seinen neuen Stuhlplatz im hinteren Teil des Klassenraumes hat. Der Augenarzt möchte daraufhin mit Tim einen Sehtest machen. Dazu muss sich Tim ein Auge zuhalten und von einem an einer Wand hängenden Plakat Zeichen ablesen. Tim muss die Seite nennen, an der sich die Öffnung des Ringes befindet. Mit jeder Reihe werden die Ringe kleiner. Tim kann die unterste Reihe wieder mit dem rechten noch mit dem linken Auge komplett richtig vorlesen.

1) Tim kann die unterste Reihe kaum erkennen. Das bedeutet, dass er ...
 Gegenstände in der **Ferne** schlecht erkennen kann.
 Gegenstände in der **Nähe** schlecht erkennen kann.
 Der Augenarzt bietet Tim, eine Brille aufzusetzen. Damit kann Tim auch die unterste Reihe viel besser erkennen. Tim ist überrascht und der Augenarzt erklärt Tim, dass er eine **Sehschwäche** hat. Genaue gesagt ist **sein Augapfel zu lang**, sodass kein scharfes Bild entstehen kann.

2) Tims Augapfel ist zu lang, damit ist der Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut zu (groß/klein).

4 Wie entsteht ein scharfes Bild?
 Damit wir einen Baum scharf sehen können, müssen sich alle 3 Teilstrahlen in einem Punkt auf der Netzhaut treffen.

3) Markiere den Punkt, an dem sich die 3 Teilstrahlen auf der Netzhaut treffen.

4a) Zeichne eine zusätzliche Netzhaut ca. 2 Kästchen weiter links ein und beschrifte sie mit a).
 Treffen sich die Teilstrahlen auf der Netzhaut in einem Punkt? (groß/klein) ist, weil der Abstand zwischen Linse und Netzhaut zu (kurz/lang) ist.
 Der Augapfel ist hier zu (kurz/lang).

b) Zeichne eine weitere Netzhaut ca. 2 Kästchen weiter rechts ein und beschrifte sie mit b). Verlangere außerdem die drei Teilstrahlen, sodass sie auf diese Netzhaut treffen.
 Treffen sich die Teilstrahlen auf der Netzhaut in einem Punkt? (groß/klein) ist, weil der Abstand zwischen Linse und Netzhaut zu (kurz/lang) ist.
 Der Augapfel ist hier zu (kurz/lang).

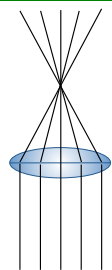
c) Welche Position hat Tims Netzhaut in der Abbildung? (a/b)

5 Sehfehler korrigieren

Damit ein scharfes Bild auf der Netzhaut erzeugt wird, obwohl der Abstand zwischen der Linse und Netzhaut zu groß ist, **müssen sich die Brennpunkte verschieben**. Die Linse des Auges kann die Position der Brennpunkte jedoch nicht verändern. Das kann nur erreicht werden, indem eine zusätzliche Linse durch eine **Brille** vor das Auge gebracht wird.

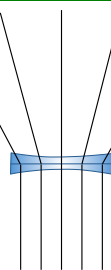
Es gibt zwei unterschiedliche Linsentypen: Die **Sammellinse** und die **Zerstreuungslinse**.

Sammellinse
 Eine Sammellinse sammelt die Lichtstrahlen in einem Punkt (**Brennpunkt**). Du kennst die Sammellinse bereits, ist die Linse des Auges auch eine Sammellinse ist.



Eine Brille mit Sammellinsen sorgt dafür, dass Gegenstände in der Nähe scharf gesehen werden können. Mit Sammellinsen wird eine **Weitsichtigkeit** korrigiert.

Zerstreuungslinse
 Eine Zerstreuungslinse zerstreut die Lichtstrahlen.



Eine Brille mit Zerstreuungslinsen sorgt dafür, dass Gegenstände in der Ferne scharf gesehen werden können.

Mit Zerstreuungslinsen wird eine **Kurzsichtigkeit** korrigiert.

Die Linse im Auge
 Tim hat in der Schule Kopfschmerzen. Der Augenarzt sagt ihm, dass seine Kopfschmerzen daher kommen, weil er Gegenstände in der... (Näherferne) schlecht erkennen kann. Sein Augapfel ist zu... (kurz/lang), womit der Abstand zwischen seiner Linse und seiner Netzhaut zu... (groß/klein) ist. Tim ist also... (kurzsichtig/weitsichtig). Seine Sehschwäche kann durch eine Brille mit... (Sammel-/Zerstreuungslinsen) korrigiert werden.


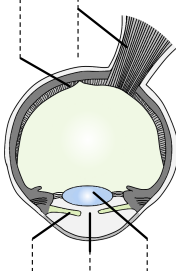
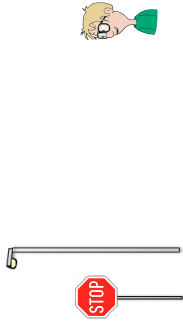
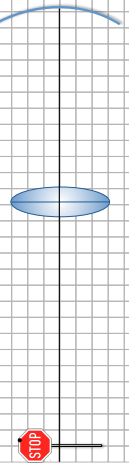



Tim's neue Brille hilft ihm, ... (sein Heft/die Tafel) in der... (Näherferne) wieder deutlich zu sehen und seine Kopfschmerzen sind auch weg.

Kürzel zu Lernmaterialversion 3

Kürzel	Kurzbeschreibung	Kürzel	Kurzbeschreibung
1T1	Tim im Unterricht	3A3b	Brennpunkte beschriften
1A1	Vermutung aufstellen	3A4a	Teilstrahlen vom unteren Ausgangspunkt zeichnen
1T2	Tim vor dem Spiegel		
1I1	Iris, Pupille, Lederhaut	3A4Tipp	1. Teilstrahl ist gespiegelt
1A2	Äußeres Auge beschriften	3A4b	Treffpunkt markieren
1I2	Querschnitt des Auges (gesamt)	3A5	Teilstrahlen von einem beliebigen Punkt zeichnen
1I2a	Text: Aufbau inneres Auge		
1I2b	Abbildung Querschnitt des Auges		
		4T1	Tim beim Augenarzt
2T1	Tim mit der Taschenlampe	4A1	Ergebnis Sehtest: Ferne
2I1	Geradlinige Lichtausbreitung (gesamter Kasten)	4I1a	Abstand Linse – Netzhaut ist zu groß
2I1a	Text: Geradlinige Ausbreitung	4I1b	Bild: langer & kurzer Augapfel
2I1b	Abbildung: Lichtstrahlen im Wald	4A2	Abstand ist zu groß
2I2	Reflexion von Licht	4I2	Treffpunkt auf der Netzhaut
2A1	Weg des Lichts zeichnen (Lampe)	4A3	Treffpunkt markieren
2A1Tipp	Zeichne in Form von Pfeilen	4A4a	Beide Netzhäute zeichnen
2I3	Augen als Lichtempfänger	4A4b	Lücken ausfüllen
		4A4c	Position von Tims Netzhaut = b)
		4I3	weitsichtig & kurzsichtig
3I1	Wiederholung: Reflexion von Tageslicht	4A5	kurzsichtig
3A1a	Weg des Lichts zeichnen (Sonne)	4A6a	3 Teilstrahlen zeichnen (2x)
3A1b	Linse und Netzhaut beschriften	4A6b	Brennpunkte einzeichnen
3I2a	Lichtstrahl = 3 Teilstrahlen (gesamter Kasten)	4A6Tipp	Beginne mit dem 2. Teilstrahl
		4A6Tipp2	3. Teilstrahl rückwärts zeichnen
3A2a	Linse und Netzhaut beschriften	4A7	Brennpunkte verschieben sich
3A2b	Brennpunkt des 1. Teilstrahls		
3A2c	Brennpunkt des 3. Teilstrahls	5I2	Infokasten (gesamt)
3A3a	Teilstrahlen vom oberen Ausgangspunkt zeichnen	5I2a	Sammellinse
		5I2b	Zerstreuungslinse
3A3Tipp1	Beginne mit dem 2. Teilstrahl	5A1	Lückentext
3A3Tipp2	3. Teilstrahl rückwärts zeichnen		

Wissenstest

	Lernmaterialien zum Thema Optik Test	Name: _____ Datum: _____	
1. Beschrifte die Abbildung zum Querschnitt des menschlichen Auges.			
			
2. Tim läuft nach dem Fußballtraining nach Hause. Es ist bereits dunkel, sodass die Straßenschilder schon an sind. Auf dem Heimweg kommt er an einer Kreuzung vorbei und sieht schon von weitem, dass es sich um eine Kreuzung mit einem Stoppschild handelt.			
Zeichne den Weg des Lichts ein.			
			
3. Der Weg des Lichts durch das Auge			
a) Zeichne die 3 Teilstrahlen ein, die vom dem oberen Punkt des Stoppschildes ausgehen.			
			
b) Zeichne die Brennpunkte ein und beschrifte sie.			
4. Tim kann Gegenstände in der _____ (Nähe/Ferne) schlecht erkennen. Ihr Augapfel ist zu _____ (lang/kurz), womit der Abstand zwischen ihrer Linse und ihrer Netzhaut zu _____ (groß/klein) ist. Ihre Weitsichtigkeit kann durch eine Brille mit _____ (Sammellinsen/Zerstreuungslinsen) korrigiert werden.			
			
4. Tims ältere Schwester Lisa macht auch einen Sehtest beim Augenarzt. Es stellt sich heraus, dass sie ebenfalls eine Sehschwäche hat. Im Gegensatz zu Tim ist Lisa weitsichtig . Fülle den Lückentext aus.			
5. Zeichnen Sie ein Fernrohr.			
6. Zeichnen Sie ein Teleskop.			
7. Zeichnen Sie ein Mikroskop.			
8. Zeichnen Sie ein Periskop.			
9. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
10. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
11. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
12. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
13. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
14. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
15. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
16. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
17. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
18. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
19. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
20. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
21. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
22. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
23. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
24. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
25. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
26. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
27. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
28. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
29. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
30. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
31. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
32. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
33. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
34. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
35. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
36. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
37. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
38. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
39. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
40. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
41. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
42. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
43. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
44. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
45. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
46. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
47. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
48. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
49. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
50. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
51. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
52. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
53. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
54. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
55. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
56. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
57. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
58. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
59. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
60. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
61. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
62. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
63. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
64. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
65. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
66. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
67. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
68. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
69. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
70. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
71. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
72. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
73. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
74. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
75. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
76. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
77. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
78. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
79. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
80. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
81. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
82. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
83. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
84. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
85. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
86. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
87. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
88. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
89. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
90. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
91. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
92. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
93. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
94. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
95. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
96. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
97. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
98. Zeichnen Sie ein Refraktor.			
99. Zeichnen Sie ein Spiegelteleskop.			
100. Zeichnen Sie ein Refraktor.			

Interviewleitfaden

Interviewleitfaden Kapitel 1-3	Interviewleitfaden Kapitel 4 & 5
<p>1. Wie findest du das Lernmaterial?</p> <ol style="list-style-type: none"> Was hat dir gut gefallen? Warum? Was hat dir weniger / gar nicht gefallen? Warum? <p>2. Verständlichkeit</p> <ol style="list-style-type: none"> Was hast du besonders gut / leicht verstanden? Warum? Was hast du gar nicht / nur schwer verstanden? <p>3. Informationsdichte</p> <ol style="list-style-type: none"> Hast du dir beim Bearbeiten Fragen gestellt, die durch das Material nicht beantwortet wurden? → Fehlte dir irgendwo eine Erklärung? Gibt es irgendwo zu viele Erklärungen, die dich eigentlich nur verwirrt haben? <p>4. Aufgabenschwierigkeit</p> <ol style="list-style-type: none"> Welche Aufgaben fielen dir leicht? Warum? Welche Aufgaben fielen dir schwer? Warum? <p>5. Hast du sie trotzdem gelöst? Wie?</p> <p>6. Aufgabe zum Zeichnen der Lichtstrahlen (S. 3): Hat dir der Tipp zum Weg des Lichts von Tims Taschenlampe geholfen? Hast du dich daran orientiert?</p> <p>7. Kapitel 3 Aufgabe 3, 4 und 5 zum Zeichnen der Teilstrahlen (S. 4):</p> <ol style="list-style-type: none"> Hast du dich dabei an dem grünen Kasten zuvor (S. 3) orientiert? Hat dir der Tipp, dass du mit dem 2. Teilstrahl beginnen sollst, geholfen? Hat dir der Tipp, dass der 3. Teilstrahl von der Netzhaut ausgehend gezeichnet werden soll, geholfen? Hat dir der Tipp, dass die Teilstrahlen gespiegelt sind, geholfen? 	<p>1. Wie findest du das Lernmaterial?</p> <ol style="list-style-type: none"> Was hat dir gut gefallen? Warum? Was hat dir weniger / gar nicht gefallen? Warum? <p>2. Verständlichkeit</p> <ol style="list-style-type: none"> Was hast du besonders gut / leicht verstanden? Warum? Was hast du gar nicht / nur schwer verstanden? <p>3. Informationsdichte</p> <ol style="list-style-type: none"> Hast du dir beim Bearbeiten Fragen gestellt, die durch das Material nicht beantwortet wurden? → Fehlte dir irgendwo eine Erklärung? Gibt es irgendwo zu viele Erklärungen, die verwirrend sein könnten? <p>4. Aufgabenschwierigkeit</p> <ol style="list-style-type: none"> Welche Aufgaben fielen dir leicht? Warum? Welche Aufgaben fielen dir schwer? Warum? <p>5. Hast du sie trotzdem gelöst? Wie?</p> <p>6. Aufgabe zum Zeichnen der Teilstrahlen (S. 6, unterste Zeichnung): Ist es dir leicht oder schwer gefallen, die 3 Teilstrahlen einzuzuzeichnen?</p> <ol style="list-style-type: none"> Woran hast du dich dabei orientiert? Sind dir Tipps in der Sprechblase hilfreich? Ist dir sofort aufgefallen, dass sich die Brempunkte verschieben? <p>7. Lückentext (S. 7):</p> <ol style="list-style-type: none"> Hast du beim Bearbeiten des Lückentextes zurückgeblättert? Hat dir die Bearbeitung des Lückentextes beim Verstehen des Gesamtzusammenhangs geholfen? <p>Interviewleitfaden abschließend</p> <ol style="list-style-type: none"> Wie findest du die Geschichte über Tim? Was bedeuten die grauen Kästen? Was bedeuten die grünen Kästen? Sind die Stifte und Lineale neben den grauen Kästen sinnvoll? Kannst du Unterschiede zwischen diesen Materialien und den sonstigen aus der Schule / deinem Unterricht feststellen? → Gefallen dir diese Materialien besser oder schlechter? Möchtest du jetzt mehr über das Thema Optik erfahren? (z.B. mehr über das Auge oder mehr über Brillen) Möchtest du abschließend noch etwas über die Lernmaterialien sagen?

Reliabilitätstest

Auswertung der Aufgaben in den Lernmaterialien

Dargestellt: Die von den Probanden gelösten Aufgaben (1=korrekt, 2=falsch, 0=fehlt)

Proband Kürzel	Codierer 1		Codierer 2																	
	1	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13					
1A1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1
1A2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2A1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3A1a	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
3A1b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1
3A2a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3A2b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3A2c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3A3a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3A3b	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	2	2	2	2	2	2
3A4a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	1	1
3A4b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1
3A5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1
4A1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4A2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4A3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
4A4a	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4A4b	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	1
4A4c	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4A5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4A6a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4A6b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
4A7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1
5A1	2	0	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	1	1



		Codierer 1			Σ
		korrekt (=1)	falsch (=2)	fehlt (=0)	
Codierer 2	korrekt (=1)	275*	0**	1**	275
	falsch (=2)	7**	20*	0**	27
	fehlt (=0)	0**	1**	8*	9
	Σ	282	21	9	312

* Übereinstimmungen zwischen beiden Codierern

** Fälle, die nicht übereinstimmen

Auswertung der Aufgaben im Wissenstest

Dargestellt: Die von den Probanden gelösten Aufgaben (1=korrekt, 2=falsch, 0=fehlt)

Proband Aufgabe	Codierer 1		Codierer 2														
	1	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
1	2	2	2	2	1	2	1	2	1	1	2	2	2	2	2	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3a	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3b	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3c	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3d	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3e	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2
4	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1



		Codierer 1			Σ
		korrekt (=1)	falsch (=2)	fehlt (=0)	
Codierer 2	korrekt (=1)	82*	0**	0**	82
	falsch (=2)	5**	15*	0**	20
	fehlt (=0)	0**	0**	2*	2
	Σ	87	15	2	104

* Übereinstimmungen zwischen beiden Codierern

** Fälle, die nicht übereinstimmen

Auswertung der Transkripte

Dargestellt: Die von den Probanden als schwierig empfundenen Abschnitte

Transkript Kürzel	Codierer 1		Codierer 2													Σ												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	Σ	Σ													
formal		x x	x x	x x	x x		x x	x	x					6	6													
1T1				x x										1	1													
1A1	x x			x x		x x			x x					4	4													
1A2						x x								1	1													
1I2						x								1	0													
2A1	x x	x x		x x		x x								4	4													
3A1a													x x	1	1													
3A1b			x	x x	x	x			x x	x				5	3													
3I2		x		x		x x								2	2													
3A2a				x										0	1													
3A2b				x x						x				2	1													
3A2c				x x										1	1													
3A3a					x	x x	x				x			2	3													
3A3Tipp1		x				x								0	2													
3A3b					x x	x		x x				x		4	2													
3A3Tipp2		x				x								0	2													
3A4a						x x	x			x				3	1													
3A4Tipp						x								0	1													
3A4b			x			x								2	0													
3A5					x	x x	x				x x			4	2													
4T1							x x							1	1													
4A2									x x					1	1													
4A3	x x							x x						2	2													
4A4a				x x	x x			x x	x x					4	4													
4A4b	x x	x x		x x				x x	x x					5	5													
4A4c	x							x	x					3	0													
4A6a				x x	x x	x x				x x	x			4	5													
4A6Tipp1		x												0	1													
4A6b						x x				x x	x		x	3	3													
4A6Tipp2		x												0	1													
4A7	x					x			x x			x x	x x	4	4													
5I1			x							x x		x x		2	3													
5A1												x		0	1													
Σ	5	5	3	9	3	1	11	11	6	5	14	12	5	2	5	5	9	6	5	6	1	3	2	2	3	2	72	70




		Codierer 1		
		kann bestehen bleiben	sollte verbessert werden	Σ
Codierer 2	kann bestehen bleiben	600*	21**	621
	sollte verbessert werden	17**	51*	68
Σ		617	72	689

* Übereinstimmungen zwischen beiden Codierern

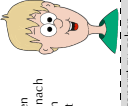
** Fälle, die nicht übereinstimmen

Anhang zur Hauptstudie III

Abschlussversion der Lernmaterialien



Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 1: Der Aufbau des menschlichen Auges



Tim ist 12 Jahre alt und geht in die 6. Klasse. Seitdem er seinen neuen Sitzplatz in der hintersten Reihe des Klassenzimmers hat, plagen ihn nach dem Unterricht starke Kopfschmerzen. Seine Lehrerin rät ihm, einen Augenarzt aufzusuchen, weil sie beobachtet hat, dass er ständig mit zusammengekniffenen Augen im Unterricht sitzt.

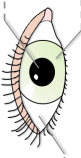
1) Stelle eine Vermutung auf, warum die Lehrerin Tim rat, zum Augenarzt zu gehen.

Erstlich zu Hause angekommen, steht Tim vor dem Spiegel und beobachtet seine Augen. Seiner Meinung nach sehen seine grünen Augen aus wie immer. Er überlegt, wie das Sehen überhaupt funktioniert; Ganz klar zum Sehen brauchen wir unsere **Augen**. **Licht** muss auch vorhanden sein, weil wir im Dunkeln nicht sehen können.

1 Der Aufbau des menschlichen Auges

Tim kann bei dem Blick in den Spiegel seine grün gefärbte **Iris** erkennen. Außerdem sieht er seine **Pupille**, die eigentlich nur ein Loch in der Iris ist. Durch die Pupille fällt Licht in das Auge ein. Auch die **Lederhaut**, die den weißen Teil des Auges bildet, kann Tim sehen. Das Auge wird auch als **Augapfel** bezeichnet.


2) Beschrifte die Abbildung mit den Begriffen Iris, Pupille, Lederhaut.



Damit das Sehen funktioniert, sind besonders die **Iris** und die **Pupille**, die **Linse** und die **Netzhaut** erforderlich. Die **Linse** und die **Netzhaut** sind von außen nicht sichtbar. In dem Querschnitt des **Augapfels** ist die **Pupille** als Loch in der **Iris** deutlich zu erkennen.

Hinter der **Pupille** befindet sich die **Linse**, die dafür sorgt, dass wir Gegenstände scharf und deutlich sehen können.

Die **Netzhaut** ist dafür zuständig, das gesehene Bild wahrzunehmen und die Informationen über den **Sehnerv** an das Gehirn weiterzuleiten. Der **Sehnerv** ist ebenfalls von außen nicht sichtbar.

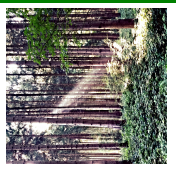


Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 2: Ausbreitung und Reflexion von Licht

Tim wacht mitten in der Nacht auf und möchte sich etwas zu trinken holen. In seinem Zimmer ist es völlig dunkel und seine Nachtschlampe ist kaputt. Er hat aber vorsorglich eine Taschenlampe auf seinem Nachttisch stehen, mit der er den Weg zur Tür ganz einfach finden kann.

2 Ausbreitung und Reflexion von Licht



Licht breitet sich immer in Form eines Lichtbündels **geradlinig** aus.



Das kann man besonders gut beobachten, wenn die Lichtstrahlen der Sonne durch die Bäume eines Waldes fallen.

Auch das Licht der Taschenlampe breitet sich geradlinig aus. Alles, was Tim nicht mit dem Lichtstrahl anleuchtet, kann er nicht sehen oder nicht hören. Die Gegenstände, die von der Taschenlampe angestrahlt werden, werden das Licht zurück. Dieses Zurückwerfen des Lichts nennt man **Reflexion**. Aus dem Grund kann Tim zum Beispiel seine Zimmertür sehen.

Zeichne ein, welchen Weg das Licht von der Taschenlampe zur Tür nimmt und von dort zurück zu Tim, damit er seine Tür sehen kann. Zeichne beide Wege jeweils als Pfeile ein.

Unsere Augen können als Lichtempfänger bezeichnet werden. Wir können unsere Umwelt sehen, weil die Gegenstände das Licht reflektieren und das Licht von den Gegenständen auf unsere Augen trifft.

Lernmaterialien zum Thema Optik

Kapitel 3: Der Weg des Lichts durch das Auge

Tagüber braucht Tim keine Taschenlampe, weil das Licht der Sonne zum Sehen ausreicht. Die Sonnenstrahlen treffen auf die Gegenstände in unserer Umwelt und werden von diesen reflektiert. Wenn wir einen Baum betrachten, dann reflektiert der Baum das Licht der Sonne. Dieses reflektierte Licht trifft auf unsere Augen.

a) Zeichne den Weg des Lichts ein.
Tipps: Schau dir noch einmal den Weg des Lichts von Tims Taschenlampe an.

b) Beschrifte die Linse und die Netzhaut im Querschnitt des Auges.

3 Der Weg des Lichts durch das Auge

Auf der Netzhaut unserer Augen entsteht ein Abbild des Baumes. Dafür ist die Linse verantwortlich. Von jedem Punkt des Baumes werden die Lichtstrahlen der Sonne reflektiert. Dabei teilt sich jeder reflektierte Lichtstrahl in 3 Teilstrahlen auf:

Durch die Mitte der Pupille und der Linse verläuft die optische Achse und trifft auf die Mitte der Netzhaut.

Zuhilfenahme der Linse und der Netzhaut

Der 1. Teilstrahl verläuft vor der Linse parallel zur optischen Achse. Zwischen der Linse und der Netzhaut schneidet er die optische Achse im Brennpunkt der Linse.

Der 2. Teilstrahl verläuft vor der Linse parallel zur optischen Achse. Zwischen der Linse und der Netzhaut schneidet er die optische Achse im Brennpunkt der Netzhaut.

Der 3. Teilstrahl verläuft vor der Linse parallel zur optischen Achse. Zwischen der Linse und der Netzhaut schneidet er die optische Achse im Brennpunkt der Linse.

Der 3. Teilstrahl schneidet die optische Achse zwischen der Linse und dem Baum. Hier liegt der Brennpunkt des 3. Teilstrahls. Er verläuft parallel zur optischen Achse.

Lernmaterialien zum Thema Optik

Kapitel 3: Der Weg des Lichts durch das Auge

3a) Vervollständige die Zeichnung, indem du die 3 Teilstrahlen, ausgehend von der mittleren Baumkrone, einzeichnest. Als Hilfe ist der 1. Teilstrahl eingezeichnet. Orientiere dich beim Zeichnen an dem grünen Kreis auf der vorderen Seite und beachte die Tipps in den Sprechblasen.

b) Beschrifte die Brennpunkte in der Zeichnung.

Tipps:

Tipps 1: Beginne mit dem 2. Teilstrahl (Mittelpunktstrahl). Er ist einfacher als der 3. Teilstrahl rückwärts zu zeichnen! Beginne also hier mit dem Punkt auf der Netzhaut.

Tipps 2: Der 1. Teilstrahl muss zwischen der Linse und der Netzhaut parallel zur optischen Achse verlaufen.

3b) Vervollständige die Zeichnung, indem du die 3 Teilstrahlen, ausgehend von dem Baumstamm, einzeichnest.

b) Markiere den Punkt in der Zeichnung, an dem sich die 3 Teilstrahlen auf der Netzhaut treffen.

Tipps:

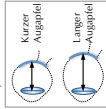
Tipps 1: Beachte, dass die Teilstrahlen hier gespiegelt sind. Der 1. Teilstrahl befindet sich nun unten.

3c) Zeichne die 3 Teilstrahlen von dem vorgegebenen Punkt des Baumes ausgehend.

Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 4: Wie entsteht ein scharfes Bild?

Tim hat einen Termin beim Augenarzt. Er erzählt von seinen Kopfschmerzen, seitdem er seinen neuen Stuhlplatz im hinteren Teil des Klassenraumes hat. Der Augenarzt möchte daraufhin mit Tim einen Sehtest machen. Dazu muss sich Tim ein Auge zuhalten und von einem an einer Wand hängenden Plakat Zeichen ablesen. Tim muss die Seite nennen, an der sich die Öffnung des Ringes befindet. Mit jeder Reihe werden die Ringe kleiner. Tim kann die unterste Reihe wieder mit dem rechten noch mit dem linken Auge komplett richtig vorlesen.

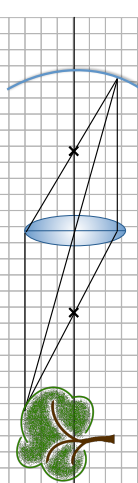
- 1) Tim kann die unterste Reihe kaum erkennen. Das bedeutet, dass er ...
 - Gegenstände in der **ferne** schlecht erkennen kann.
 - Gegenstände in der **Nähe** schlecht erkennen kann.
- Der Augenarzt bietet Tim, eine Brille aufzusetzen. Damit kann Tim auch die unterste Reihe viel besser erkennen. Tim ist überrascht und der Augenarzt erklärt Tim, dass er eine **Sehschwäche** hat. Genaue gesagt ist **sein Augapfel zu lang**, sodass kein scharfes Bild entstehen kann.
- 2) Tims Augapfel ist zu lang, damit ist der Abstand zwischen der Linse und der Netzhaut zu ... (groß/klein).



4 Wie entsteht ein scharfes Bild?

Damit wir einen Baum scharf sehen können, müssen sich alle 3 Teilstrahlen in einem Punkt auf der Netzhaut treffen.

- 3) Markiere den Punkt, an dem sich die 3 Teilstrahlen auf der Netzhaut treffen.

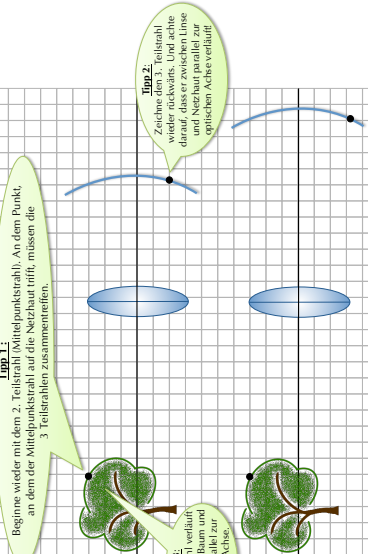


- 4a) Zeichne eine zusätzliche Netzhaut ca. 2 Kästchen weiter links ein und beschrifte sie mit a).
Treffen sich die Teilstrahlen auf der Netzhaut in einem Punkt? ... (groß/klein) ist, weil der Abstand zwischen Linse und Netzhaut zu ... (kurz/lang) ist.
Der Augapfel ist hier zu ... (kurz/lang).
- b) Zeichne eine weitere Netzhaut ca. 2 Kästchen weiter rechts ein und beschrifte sie mit b). Verlängere außerdem die drei Teilstrahlen, sodass sie auf diese Netzhaut treffen.
Treffen sich die Teilstrahlen auf der Netzhaut in einem Punkt? ... (groß/klein) ist, weil der Abstand zwischen Linse und Netzhaut zu ... (kurz/lang) ist.
Der Augapfel ist hier zu ... (kurz/lang).
- c) Welche Position hat Tims Netzhaut in der Abbildung? ... (a/b)

Lernmaterialien zum Thema Optik
Kapitel 4: Wie entsteht ein scharfes Bild?

Personen, die Gegenstände in der Nähe schlecht erkennen können, haben einen zu **kurzen** Augapfel und sind **weitsichtig**.
 Personen, die Gegenstände in der Ferne schlecht erkennen können, haben einen zu **langen** Augapfel und sind **kurzsichtig**.
 5) Welche Sehschwäche hat Tim? Ist er kurz- oder weitsichtig?

- 6) Zeichne auch die Brennpunkte ein.
 Tip 1:
 Beginne wieder mit dem 2. Teilstrahl (Mittelpunktstrahl). An dem Punkt, an dem der Mittelpunktstrahl auf die Netzhaut trifft, müssen die 3 Teilstrahlen zusammentreffen.



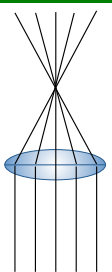
- 7) Außer der Position der Netzhaut verändert sich die Position von ...
 - der Linse.
 - den Brennpunkten.
 - dem Baum.

5 Sehfehler korrigieren

Damit ein scharfes Bild auf der Netzhaut erzeugt wird, obwohl der Abstand zwischen der Linse und Netzhaut zu groß ist, **müssen sich die Brennpunkte verschieben**. Die Linse des Auges kann die Position der Brennpunkte jedoch nicht verändern. Das kann nur erreicht werden, indem eine zusätzliche Linse durch eine **Brille** vor das Auge gebracht wird.

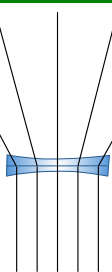
Es gibt zwei unterschiedliche Linsentypen: Die **Sammellinse** und die **Zerstreuungslinse**.

Sammellinse
 Eine Sammellinse sammelt die Lichtstrahlen in einem Punkt (**Brennpunkt**). Du kennst die Sammellinse bereits, ist die Linse des Auges auch eine Sammellinse ist.



Eine Brille mit Sammellinsen sorgt dafür, dass Gegenstände in der Nähe scharf gesehen werden können. Mit Sammellinsen wird eine **Weitsichtigkeit** korrigiert.

Zerstreuungslinse
 Eine Zerstreuungslinse zerstreut die Lichtstrahlen.



Eine Brille mit Zerstreuungslinsen sorgt dafür, dass Gegenstände in der Ferne scharf gesehen werden können.

Mit Zerstreuungslinsen wird eine **Kurzsichtigkeit** korrigiert.

Bitte lesen in Text aus Entschärfung ein paar Begriffe in Klammern.
 Tim hat in der Schule Kopfschmerzen. Der Augenarzt sagt ihm, dass seine Kopfschmerzen daher kommen, weil er Gegenstände in der.....(Näherferne) schlecht erkennen kann. Sein Augapfel ist zu.....(kurz/lang), womit der Abstand zwischen seiner Linse und seiner Netzhaut zu.....(groß/klein) ist. Tim ist also.....(kurzsichtig/weitsichtig). Seine Sehschwäche kann durch eine Brille mit.....(Sammel-/Zerstreuungslinsen) korrigiert werden.
 Tims neue Brille hilft ihm,.....(sein Heft/die Tafel) in der.....(Näherferne) wieder deutlich zu sehen und seine Kopfschmerzen sind auch weg.

