



universität
wien

DISSERTATION

Titel der Dissertation

Bilder, Animationen und Notizen

Empirische Untersuchung zur Wirkung einfacher visueller Repräsentationen
und Notizen auf den Wissenserwerb
in der Optik

Verfasserin

Mag. Krisztina Berger

angestrebter akademischer Grad

**Doktorin der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)**

Wien, im Mai 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 091 411

Dissertationsgebiet lt. Studienblatt: Physik

Betreuer: Univ.-Prof. Dr. Romano Rupp

Allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben,
sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Diese Dissertation widme ich dem Andenken
an meinen Bruder, der die letzte Station im Leben
mit größter Klarheit genommen hat:

*„Ich verstehe schon das Wesentliche.
Das Wesentliche ist in der Seele verborgen.
Das Wesentliche ist die Ordnung und
diese Ordnung in der Seele ist Selbst die reine Einfachheit.
Das Wesentliche ist die Schöpfung.
Das Wesentliche ist die Seele im Brot,
im Kleinsten das Größte,
im Krümen die Heiligkeit und
in der Ewigkeit das Allseiende.
Ich bin für die Schöpfung geboren
und habe mich für den Tod offenbart.“*

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	9
1 Lernen mit Multimedia.....	11
1.1 Begriffsklärung „Multimedia“.....	11
1.2 Kognitionspsychologische Grundlagen multimedialen und -modalen Lernens.....	13
1.3 Lernförderliche Gestaltung medialer Angebote.....	20
1.4 Der Einsatz von Lernprogrammen im Physikunterricht.....	24
2 Prinzipien der Bildgestaltung.....	29
2.1 Einflussfaktoren der lernförderlichen Bildgestaltung.....	29
2.2 Visuelle Wahrnehmung und die Gesetze des Sehens.....	31
2.3 Lernpsychologisch angemessene Gestaltung.....	39
2.4 Fachdidaktisch angemessene Gestaltung.....	48
3 Animationen.....	57
3.1 Kognitive Verarbeitung von Animationen.....	57
3.2 Lernwirksamkeit von Animationen.....	61
3.3 Optimale Gestaltung von Animationen.....	67
4 Notizen.....	75
4.1 Schreiben als kognitive Aktivierung.....	75
4.2 Der Einsatz von Notizen.....	79
5 Lernermerkmale.....	83
5.1 Themenspezifisches Vorwissen.....	83
5.2 Räumliches Vorstellungsvermögen.....	87
5.3 Sprachliche Fähigkeiten.....	88
6 Die Lehre vom Licht.....	91
6.1 Modellwahl.....	91
6.2 Alltagsvorstellungen.....	99
7 Gestaltung des Lernprogramms.....	105
7.1 Fachdidaktisch angemessene Gestaltung.....	105
7.2 Inhaltliche Sachanalyse.....	107
7.3 Kognitionspsychologisch angemessene Gestaltung.....	111
7.4 Visuelle Gestaltung.....	114
7.4.1 Umsetzung der Prinzipien der Bildgestaltung.....	114
7.4.2 Grafische Gestaltung von Animationen.....	119
7.5 Qualitative Studien zur Optimierung der Grafik.....	123
7.6 Ergebnisse der Blickbewegungsanalyse.....	132
8 Fragestellung und Methode.....	137
8.1 Forschungsfragen und Hypothesen.....	137
8.2 Untersuchungsdesign.....	139
8.3 Untersuchungsinstrumente.....	141
8.3.1 Allgemeine Fragen, Interesse und Beliebtheit der Physik.....	141

8.3.2 Selbstkonzept und Selbstwirksamkeitserwartung in der Physik.....	143
8.3.3 Testinstrumente für psychologische Konstrukte.....	144
8.3.4 Wissenstests.....	145
8.3.5 Logfiles.....	150
8.4 Stichprobe.....	152
8.5 Rahmenbedingungen der Hauptuntersuchung.....	153
8.6 Ablauf der Hauptuntersuchung.....	155
8.6.1 Vortest und Homogenisierung der Stichprobe.....	155
8.6.2 Treatmentphase und Langzeittest.....	156
8.7 Auswertungsverfahren.....	158
8.7.1 Kategorisierung und Kodierung der Items des Wissenstests.....	158
8.7.2 Angewendetes statistisches Verfahren.....	159
9 Ergebnisse.....	165
9.1 Ergebnisse des Vortests.....	165
9.2 Akzeptanz des Lernprogramms.....	170
9.3 Einfluss von Visualisierungsart und Notizen auf den Lernerfolg.....	176
9.4 Einfluss der Visualisierungsart auf den Lernerfolg	178
9.5 Einfluss von Lernermerkmale und Visualisierungsart auf den Lernerfolg.....	181
9.5.1 Geschlecht.....	181
9.5.2 Räumliches Vorstellungsvermögen.....	185
9.5.3 Sprachliche Fähigkeiten.....	189
9.6 Einfluss der Anfertigung von Notizen auf den Lernerfolg.....	191
9.7 Einfluss der Lernermerkmale und von Notizen auf den Lernerfolg.....	194
9.7.1 Geschlecht.....	194
9.7.2 Räumliches Vorstellungsvermögen.....	197
9.7.3 Sprachliche Fähigkeiten.....	198
10 Zusammenfassung.....	201
11 Literaturverzeichnis.....	215
Anhang.....	241
A Die Bildversion des Lernprogramms.....	241
A.1 Erster Teil des Lernprogramms.....	241
A.2 Zweiter Teil des Lernprogramms.....	262
B Ergebnisse der Blickbewegungsanalyse.....	280
C Materialien zu den Vorstudien.....	294
C.1 Anleitung.....	294
C.2 Leitfaden des Interviews.....	294
D Materialien der Hauptuntersuchung.....	297
D.1 Anweisungen zu der Hauptuntersuchung.....	297
D.2 Notizenblätter.....	298
D.3 Allgemeine Fragen.....	299
D.4 Wissenstests zum ersten Teil des Lernprogramms (T1).....	301
D.5 Wissenstests zum zweiten Teil des Lernprogramms (T2).....	306

D.6 Spezieller Wissenstest (T3) – Items der Auswertung.....	311
E Ergebnisse.....	314
E.1 Beliebtheit der Schulfächer.....	314
E.2 Akzeptanz des Lernprogramms.....	315
E.3 Wissenserwerb.....	318
E.4 Kontrollvariablen.....	336
Abstract.....	342
Lebenslauf.....	345
Publikationen.....	347

Einleitung

- Auf dem Weg zu optimalen Visualisierungen für den Wissenserwerb -

Die tagtägliche Beobachtung konfrontiert uns mit der Tatsache, dass ein „Zeitalter des Bildes“ angebrochen ist. Die technische Leichtigkeit, mit der sich Visualisierungen vervielfältigen, bearbeiten, gestalten lassen, hat die Voraussetzung für diese „ikonische Wende“ geschaffen (Boehm, 1994). Damit ist bei der Informationsvermittlung eine Verlagerung von der sprachlichen auf die visuelle Ebene zu beobachten. Sogar in den Bildungsmedien der letzten Jahre ist ein massiver Bildeinsatz zu beobachten. Es lockt „eine farbige, vielfältige und äußerst attraktive Bilderwelt, in die einzutauchen Spaß verspricht“ (Fankhauser, 2006, S.2). Visualisierungen kommen also in den Lehr- und Lernmaterialien verstärkt zum Einsatz und scheinen ein unverzichtbares didaktisches Hilfsmittel zu sein. Es stellt sich jedoch die Frage, ob diese Visualisierungen auch bewusst und angemessen wahrgenommen oder eher übersehen werden. Spielen sie überhaupt eine effektive Rolle in der Vermittlung, Aufnahme und Reflexion von Wissen? Und wenn ja, wie tun sie das?

Aus lernpsychologischer Sicht steckt in Visualisierungen viel Potenzial: Visuelle Informationen werden doppelt kodiert und damit besser behalten; weiterhin sind sie Vorlage für den Aufbau mentaler Modelle. Wie könnte dieses Potenzial visueller Repräsentationen beim Physiklernen besser ausgeschöpft werden? Wie sollten lern- bzw. verstehensfördernde Visualisierungen gestaltet werden? Unter welchen Bedingungen unterstützt die statische oder dynamische Form der Darstellung den Wissenserwerb von Schülern stärker?

Diese Fragen geben nicht nur eine Forschungsrichtung an, sondern helfen auch bei der konkreten Planung des Forschungsvorhabens der vorliegenden Arbeit. Die zumeist empirisch ausgerichtete Lehr-Lern-Forschung setzt sich zum Ziel, über die Erforschung solcher Bedingungen eine Verbesserung der Lerngelegenheiten zu erreichen. Somit ist diese Arbeit in dieser Forschungsrichtung anzusiedeln. Im Einklang damit steht die folgende Fragestellung im Mittelpunkt der Untersuchung: Unter welchen Bedingungen dient die Visualisierung dem Verstehen bzw. dem Wissenserwerb?

Das Forschungsprojekt, das hier vorgestellt wird, behandelt also die *optimale Gestaltung* von Visualisierungen im naturwissenschaftlichen Fachbereich, um eine *effektivere Nutzung* der Visualisierungen zu ermöglichen. Das Forschungsvorhaben ist, wie auch „die Probleme, die man generell zu lösen hat, interdisziplinär“ (Sukale, 2009)¹. Um dem Vorhaben gerecht zu werden, knüpft diese Arbeit an Ergebnisse aus der Wahrnehmungs- und Kognitionspsychologie, Neurobiologie, Multimediaforschung und Physikdidaktik an und versucht diese für die Entwicklung von umfassenden visuellen Gestaltungsprinzipien fruchtbar zu machen.

Dem Kontext der Fachdidaktik entsprechend wird von einem normativen Verstehensbegriff ausgegangen, d.h. das Verstehen der Lerninhalte innerhalb des Lernprozesses gelingt oder

¹ Zitat von Prof. Dr. Michael Sukale bei dem Symposium der ARGE „Resonanzen“ („Wissenschaft und Kunst“ der Österreichischen Forschungsgemeinschaft), 26.11.2009.

misslingt. Ergänzend zu diesem Verstehensbegriff werden auch Alltagsvorstellungen der Schüler mit einbezogen. Das Vorgehen innerhalb dieses Paradigmas ermöglicht, die Effektivität der visuellen Darstellungen im Hinblick auf das Sachverständnis von Lerninhalten empirisch zu prüfen. Gegenstand dieser Arbeit ist somit die Entwicklung, Durchführung und Evaluation einer Interventionsstudie zum Themenbereich „Optische Abbildung mit der Lochkamera“ im Gymnasium der Jahrgangsstufe Acht. Die visuellen Repräsentationen werden in ein Lernprogramm eingebettet. Der genannte Themenbereich ist curricular relevant, erfordert einen großen zeitlichen Umfang, ist komplex und bedarf nicht nur Behaltens- sondern auch Transferleistungen (Abschnitt 8.3.4). Damit sind die generellen Kritikpunkte des multimedialen Lernens aufgegriffen, und es wird ein Schritt in Richtung schulrelevanten Lernens gegangen.

Gesucht sind allgemeine (z.B. Prägnanz der Darstellung) und konkrete *Prinzipien der Bildgestaltung* (z.B. maximale Anzahl der Farben in einem Bild), die eine Richtlinie geben sollen, anhand derer die Güte eines Bildes für das Physiklernen beurteilt und darüber hinaus eine pragmatische Hilfe für die Bildkonstruktion geliefert werden kann. Die Wirksamkeit der Gestaltungsprinzipien soll empirisch erprobt und nachgewiesen werden.

Die Effektivität von Lernumgebungen hängt – unter anderen Faktoren – vom Einsatz statischer bzw. dynamischer Visualisierungen ab. Animationen scheinen bis jetzt unter bestimmten, aber unzureichend bekannten Bedingungen, einen Lernprozess zu fördern (Höffler & Leutner, 2006). Da die Animationen nicht generell den Wissenserwerb unterstützen, müssen Regeln ihrer Anwendung gegeben bzw. muss ihre Gestaltung systematisch optimiert werden, damit sie in Zukunft in den Lernprogrammen begründet integriert werden. In diesem Sinne werden in dieser Arbeit auch *Prinzipien der Animationsgestaltung* formuliert und angewendet. Dabei ist der Kerngedanke und die Besonderheit der Untersuchung, dass die theoriegeleitete einfach gestalteten, optimierten, und damit lernförderlichen Bilder in der Animationsentwicklung die grafische Grundlage bilden. Erst dann kann man erneut die Frage stellen, wie sich bewusst gestaltete Animationen im Vergleich zu Bildern auf den Wissenserwerb auswirken. Es gilt weiterhin zu untersuchen, ob Bilder und Animationen im Hinblick auf eine instruktionale Unterstützung der Lernenden beim Wissenserwerb gleichwertig sind. Aus mehreren Methoden der Aktivierung der Lernenden bei der Verarbeitung des Lerninhalts wird die *Anfertigung von Notizen* gewählt (Kramer, 2005; Bergeler, 2009). In einem 2*2-Design wird somit die Wirkung der unabhängigen Variablen „Visualisierungsart“ und „Notizen“ auf den Wissenserwerb der Schüler untersucht. Die leitende Forschungsfrage dieser Arbeit sucht also zu ergründen, inwieweit sich die Leistungsergebnisse von Schülern, die mit der Bildversion des Lernprogramms arbeiten, von den Leistungsergebnissen der Schüler unterscheiden, die der Animationsgruppe zugeordnet sind. Ergänzend dazu wird versucht, mit dem instruktionalen Mittel „Notizen“ auf die kognitiven Prozesse der Lernenden einzuwirken und damit zusätzliche positive Effekte im Lerngeschehen hervorzurufen.

Mit der theorie- und empiriegeleiteten Optimierung der Bilder und Animationen in themenspezifischen Kontexten trägt diese Arbeit zu einem bewussten, lernförderlichen Einsatz von Visualisierungen in Lernmedien bei. Auf diese Weise kann und sollte das Potential des visuellen Lernens für den Aufbau physikalischer mentaler Modelle ausgeschöpft werden.

1 Lernen mit Multimedia

„Die Wahrheit, die sich mit Worten beschreiben lässt,
ist nicht die ewige Wahrheit.“
(Tao te King)

1.1 Begriffsklärung „Multimedia“

Mit dem Erscheinen von neuen technischen Möglichkeiten wie z.B. dem Computer, Videorecorder oder Internet ist die Frage, welches Medium für das Lernen besser geeignet ist, in den Mittelpunkt der traditionellen Medienforschung gerückt. Wegen der generellen Verfügbarkeit der Information, der Vielfalt der Darstellungsmöglichkeiten und der Interaktion mit dem Medium wurde angenommen, dass allein der Einsatz neuer Medien an sich ein leichteres und effektiveres Lernen induziert. Das Problem dieses Ansatzes besteht darin, dass im Vergleich der Medien die Lernenden paradoxerweise vergessen wurden. „Die Mittel werden zum Zweck, ...“ wie Hartmut von Hentig es andeutet (2002, S.29). Die Absicht war zwar wohlwollend, aber die psychologischen Aspekte wurden außer Acht gelassen. Eine Metaanalyse (Kulik & Kulik, 1991, S.80), in der computerunterstütztes Lernen mit traditionellen Lehrmethoden verglichen wurde, ergibt, dass in 81% der Studien (202 von 248) die durchschnittliche Leistung von „Computer-Gruppen“ besser war als die der Kontrollgruppen. Dieser Unterschied ist allerdings nur in 34% der Studien signifikant (94 von 248). Die mittlere Effektstärke war zudem klein ($\delta = 0,3$). Trotzdem gibt es die Hoffnung, dass multimediales Lernen das Potenzial besitzt, das Lernergebnis ein wenig zu verbessern. Die Frage ist nur, wie?

Die neuere Medienforschung ist daher zu der Einsicht gelangt, dass der Ausgangspunkt aller Überlegungen immer der Nutzer sein sollte (Weidenmann, 1994, S.498f). Diese lernerzentrierte Einstellung erforderte eine neue Begrifflichkeit, derer mit unterschiedlichen Definitionen Rechnung getragen wurde:

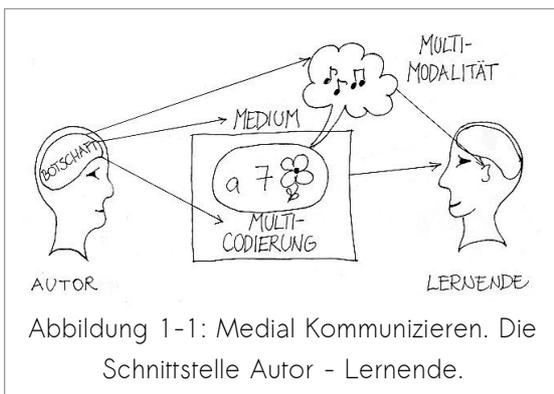
Bei Hasebrook (1997, S.101) wird das Wort „Multimedia“ nicht mehr nur im technischen Sinne aufgefasst, sondern definiert als „eine vom Lernenden unmittelbar beeinflussbare Computeranwendung, die Informationen durch mehrere Symbolsysteme, d.h. bildlich-analog oder sprachlich-sequentiell, vermittelt und dabei verschiedene Sinne anspricht“. Darunter fällt z.B. ein Lernprogramm sein, aber kein Vortrag mit Bildpräsentation, weswegen diese Definition sehr einengend ist. Auch ist die Begrifflichkeit der Definition nicht widerspruchsfrei: Wenn man von dem Nutzer ausgeht, dann muss man seine Wahrnehmung und Informationsverarbeitung als Grundlage nehmen. In diesem Sinne erfordert die visuelle Darstellung von Inhalten *parallele* Verarbeitungsprozesse. Eine *sequentielle* Verarbeitung von Information wiederum erfolgt bei auditiv dargebotenen Inhalten (in Anlehnung an Weidenmann, 1994, S.516). Von diesem Gesichtspunkt aus wäre es sinnvoll, über bildlich-parallele Symbolsysteme zu sprechen.

Weidenmann wiederum arbeitet mit differenzierteren Begriffen (2002, S.47), was zweckmäßiger für die vorliegende Arbeit ist:

- Als Medien werden technische Geräte bzw. Gegenstände bezeichnet, mit denen Information gespeichert und dargeboten wird (Buch, Computer, usw.).
- Die Codierungsform bezeichnet die Art des Symbolsystems, mit dem eine Botschaft übermittelt werden soll, z.B. Text, Bilder, Zahlen, nonverbale Töne wie Musik oder Hintergrundgeräusche.
- Die Sinnesmodalität (auditiv, visuell) drückt aus, mit welchen Sinnesorganen die Botschaft von Lernenden wahrgenommen wird.

Multimedial bedeutet in diesem Zusammenhang eine Kombination von Geräten. *Multicodal* sind Texte mit z.B. Bildern und/oder Zahlen. *Multimodal* sind z.B. audiovisuelle Lernangebote.

Mayer (2001, S.53) benützt wiederum eine großzügigere Definition: „I define a multimedia environment as one in which material is presented in more than one format, such as in words and pictures.“ Er bezeichnet also alle Lernumgebungen als multimedial, in denen mit Texten und Bildern gelehrt und gelernt wird. In dieser Hinsicht ist auch ein Schulbuch multimedial.



In Mayer's Forschung spielt eine präzise Taxonomie medialer Angebote nur eine untergeordnete Rolle. Weidenmanns begriffliche Genauigkeit hingegen gibt einen größeren Spielraum für die Beschreibung von Botschaften. Begriffe, wie Codierungsform und Sinnesmodalität, die wichtiger Bestandteil lernpsychologischer Theorien sind (vgl. Schnotz, 2001), finden sich in Weidenmanns Nomenklatur wieder und zeigen damit, dass hier der Lernprozess in den Mittelpunkt gestellt wird.

Codierungsform und Sinnesmodalität befinden sich an der Schnittstelle Autor – Lernende (Abbildung 1-1). Der Autor bestimmt, mit welchem Medium und durch welche Codierung er welche Sinne anspricht. Ob und wie diese Botschaft von den Lernenden rezipiert wird, ist Gegenstand der lernpsychologischen Forschung (siehe unten).

Hieraus geht hervor, dass Weidenmanns Präzisierung mehr der fachdidaktischen Zielsetzung der vorliegenden Arbeit entspricht als Hasebrooks Definition. Ein weiterer Grund ist, dass neben den Wirkungen statischer Bilder auf die Lernenden auch auditiv unterstützte Animationen zum Forschungsgegenstand gehören. Diese Bilder und Animationen können auch mit Hilfe von Weidenmanns Definition viel genauer beschrieben werden.

Ein **Lernprogramm** wird im Sinne dieser Definition als eine computergestützte Software verstanden, die Multicodalität und Multimodalität aufweist und der Interaktivitätsstufe I in der Taxonomie Schulmeisters (2002, S.194) entspricht. Unter *Interaktivität* wird oft eine Mischung von Navigation und Interaktion verstanden, obwohl diese scharf voneinander zu tren-

nen sind. In der *Taxonomie von Multimedia-Komponenten* (Schulmeister, 2002) wird eine sechsstufige Skalierung von Lernobjekten nach dem Kriterium der Interaktivität aufgestellt. Bei der Interaktivitätsstufe I handelt es sich noch nicht um Interaktion im eigentlichen Sinne: Der Lernende hat keinen Einfluss auf die Darstellung bzw. den Inhalt des Lernprogramms. Es handelt sich hier nur um die Möglichkeit, durch die Steuerung das eigene Lerntempo zu bestimmen oder weitere fertige Komponenten des Lernprogramms zu betrachten (Text, Bild) oder abzuspielen (Animation, Ton). Die Interaktivitätsstufe I entspricht also eher der Navigation. Unter *Interaktivität* wird in dieser Arbeit der aktive Umgang des Lernenden mit Lernobjekten bezeichnet. Welche Auswirkungen die freie Navigation bzw. das individuelle Lerntempo für den Lernprozess hat, wird im Abschnitt 1.3 erörtert.

Der lernpsychologischen Forschung ist der direkte Zugriff auf ihren Gegenstand, das Denken der Lernenden, versperrt. Daher versucht man, die Lernprozesse theoriegeleitet zu modellieren (siehe Abschnitt 1.2). Aus der Sicht der Lernprogrammentwicklung ist es genauso notwendig, den Nutzer zu verstehen, um das Angebot optimal auf seine Bedürfnisse hin abzustimmen. Dafür müssen ein Modell der kognitiven Verarbeitung von Informationen und eine Einschätzung der Fähigkeiten der Lernenden verfügbar sein. Schließlich muss auch die Einstellung zum Medium als ein affektiver Aspekt des Lernens berücksichtigt werden (Weidenmann, 1986, S.503). Ferner, da der Einsatz des Mediums immer ein Lehr- und Lernziel verfolgt, soll man den Inhalt didaktisch aufbereiten und eine sinnvolle Lehrmethode auswählen.

Festzuhalten ist, dass man nicht von einer generellen Lernförderlichkeit eines bestimmten Mediums sprechen kann. Die ältere Medienforschung hat gezeigt, dass mit allen Medien mehr oder weniger gut gelernt werden kann (Weidenmann, 1994, S.498f). Viel wesentlicher ist es zu verstehen, wie der durch mediale Vermittlung gesteuerte Lernprozess abläuft, und welche Gestaltungsmerkmale (Codierungen und Modalitäten) in Abhängigkeit von Lernermerkmalen und unterschiedlichen Lehrmethoden den Prozess fördern können (Blömeke, 2003, S.57). Angesichts dieser Ansprüche hat sich eine psychologisch fundierte Medienforschung herauskristallisiert.

1.2 Kognitionspsychologische Grundlagen multicodalen und -modalen Lernens

Um auf die Prozesse des Lernens einzugehen, wird zuerst das Gedächtnismodell von Baddeley (1986, 1999) erörtert. Hier werden drei Systeme des Gedächtnisses unterschieden, deren unterschiedliche Weise der Informationsverarbeitung und -speicherung sie im Lernprozess eine unterschiedliche Rolle übernehmen lässt.

a) Sensorisches Gedächtnis

Die Texte und Bilder treten von der Außenwelt durch Augen und Ohren in das sensorische Gedächtnis ein. Dieses ist also die Schnittstelle zwischen unbewusster Wahrnehmung und Ar-

beitsgedächtnis. Es enthält für nur einige hundert Millisekunden die genaue Information in reizspezifischem Format (Mayer, 2001, S.43; Buchner, 2006, S.446f).

b) Arbeitsgedächtnis

Das Arbeitsgedächtnis wird als das aktive Bewusstsein erlebt. Es besteht aus drei Komponenten: eine zentrale Kontrolleinheit, die zentrale Exekutive genannt wird, und zwei Subsysteme, die phonologische Schleife und der visuell-räumliche Notizblock (Buchner, 2006, S.445). Ihren Inhalt bilden die nicht mehr in der Umwelt zur Verfügung stehenden Informationen (Ullsperger & Cramon, 2006, S.482). Das Arbeitsgedächtnis wird auch als zeitlich distinkter Prozess betrachtet, weil sein Inhalt für einen Zeitraum von Sekunden bis Minuten gehalten wird. Außerdem wird hier die aufgenommene Information umorganisiert (Markowitsch, 2006, S.453-456).

c) Langzeitgedächtnis

Das Langzeitgedächtnis enthält das ganze Wissen des Lernenden. Es kann eine große Menge an Informationen für lange Zeit speichern, aber sein Inhalt ist für Lernende nur zugänglich, wenn das Wissen aktiviert und ins Arbeitsgedächtnis gerufen wird (Mayer, 2001, S.45). Im Fall des Vergessens hat eine abweichende Information modifizierende bzw. auslöschende Wirkung auf die im Langzeitgedächtnis gespeicherte Information (Buchner, 2006, S.444). Diese Tatsache spricht dafür, dass der Lernende sein Wissen immer wieder neu rekonstruiert. Das Erinnern kann also nicht mit einem einfachen Abruf von Information gleichgesetzt werden. Die Idee der Rekonstruktion des Gelernten verlangt nach einer aktiven Rolle des Lerners beim Wissenserwerb.

Um auf die Verstehensprozesse sinnvoll einwirken zu können, muss man wissen, wie die verschiedenen Codes und Modalitäten im Laufe des Lernens verarbeitet werden. Zur Zeit werden zwei kognitionspsychologische Modellvorstellungen diskutiert, die generative Theorie multimedialen Lernens vom Richard E. Mayer („A Cognitive Theory of Multimedia Learning“, 2001, S.41-61) und der Modellansatz vom Wolfgang Schnotz (Schnotz & Bannert, 1999). Für das Lernen mit multicodalen und -modalen Repräsentationen können beide Ansätze einen theoretischen Bezugsrahmen liefern, sodass diese Arbeit nicht der Notwendigkeit unterliegt, hier eine Entscheidung treffen zu müssen. Dies läge zudem außerhalb ihres Forschungsinteresses.

Dieser Abschnitt konzentriert sich auf Mayers Theorie, wobei an denjenigen Stellen, an denen deutliche Differenzen zum Ansatz von Schnotz vorliegen, entsprechend erläuternde Hinweise gegeben werden. Zunächst soll geklärt werden, was Mayer unter dem Begriff „Multimedialernen“ versteht. Seiner „Multimedia“-Definition entsprechend (Abschnitt 1.1), bezeichnet er das Multimedialernen auch als einen Lehr- und Lernprozess, in dessen Verlauf den Lernenden die zu vermittelnden Inhalte mit Hilfe von Texten (visuell + auditiv) und Bildern angeboten werden. Anhand der oben beschriebenen Grundlagen werden Mayers drei grundsätzliche Annahmen multimedialen Lernens vorgestellt:

1. **Zwei Verarbeitungssysteme** (*Dual-Channel Assumption*², Mayer, 2001, S.46ff).

In der Informationsverarbeitung werden zwei qualitativ verschiedene, jedoch miteinander interagierende Verarbeitungssysteme angenommen. Diese Interaktion wird auch durch einen hirnhypophysologischen Befund gestützt: es zeigte sich, dass nicht die Spezialisierung der Großhirnhälften im Hinblick auf einige Aktivitäten wichtig ist, sondern wie die einzelnen Gehirna-reale miteinander verknüpft sind (Hebb, 1995, S.70).

Mayer unterscheidet, wie oben erwähnt, nicht zwischen Codes und Modalitäten, so dass die unterschiedlichen Eigenschaften der Zeichensysteme unberücksichtigt bleiben. Er nimmt den Subsystemen des Arbeitsgedächtnisses entsprechend zwei Kanäle an, die sich hinsichtlich Codierung und Modalität überlappen: einen visuell/piktorialen und einen auditiv/verbalen Kanal. Schnotz hält dies für eine Schwäche des Modells von Mayer, weil zwischen Prozessen der Bild- und Textverarbeitung kein Unterschied gemacht wird (Schnotz & Bannert, 1999, S.221).

2. **Limitierte Verarbeitungskapazität** (*Limited-Capacity Assumption*, Mayer, 2001, S.48ff)

Die *Cognitive-Load*-Theorie stammt von John Sweller und seinen Mitarbeitern. Die Kernaussage ist, dass die Menge der Information, die in das Arbeitsgedächtnis aufgenommen und verarbeitet werden kann, für jedes Verarbeitungssystem begrenzt ist. Bei einer Überschreitung von Kapazitäten (*cognitive overload*), wird das Lernen behindert, sogar unterbrochen. Die Ressourcen werden folgender Weise beansprucht:

Das *intrinsic cognitive load* (intrinsische kognitive Belastung) ist eine kognitive Belastung, die durch die Schwierigkeit des Lerngegenstandes selbst verursacht wird. Sie hängt davon ab, wie viele Informationselemente im Lernstoff vorhanden sind und wie komplex diese miteinander verknüpft sind (vgl. Girwidz, 2004, S.16). Im Durchschnitt können fünf bis sieben „chunks“ (Informationseinheiten) im Arbeitsgedächtnis gleichzeitig verfügbar sein. Eine Methode, um diese Kapazität besser auszunutzen, ist die Gruppierung von Elementen. So kann man sich fünf bis sieben Gruppen merken, die dann mehrere Elemente beinhalten. Eine Telefonnummer z.B. in der Form von 0-1-7-9-7-1-0-4-0-6-3 (11 chunks) kann man sich schwer merken. Aber wenn sie gruppiert wird 0179-710-40-63 (4 chunks) ist sie leichter merkbar (vgl. Mayer, 2001, S.49). Analog verhält es sich mit komplexen Lerninhalten. Der Lernende soll zuerst Teilaspekte des Lernstoffes verstehen, d.h. kleinere Gruppen von interagierenden Einzelelementen ausbilden, sie im Langzeitgedächtnis speichern, und auf sie beim Verstehen eines komplexen Sachverhalts zurückgreifen.

Das *extraneous cognitive load* (extrinsische kognitive Belastung; Mayer, 2001, S.50) wird durch die Lernumgebung hervorgerufen. Durch eine unangemessene Strukturierung und/oder Präsentation des Lerninhalts wird eine überflüssige kognitive Belastung verursacht, die nach Möglichkeit reduziert werden soll.

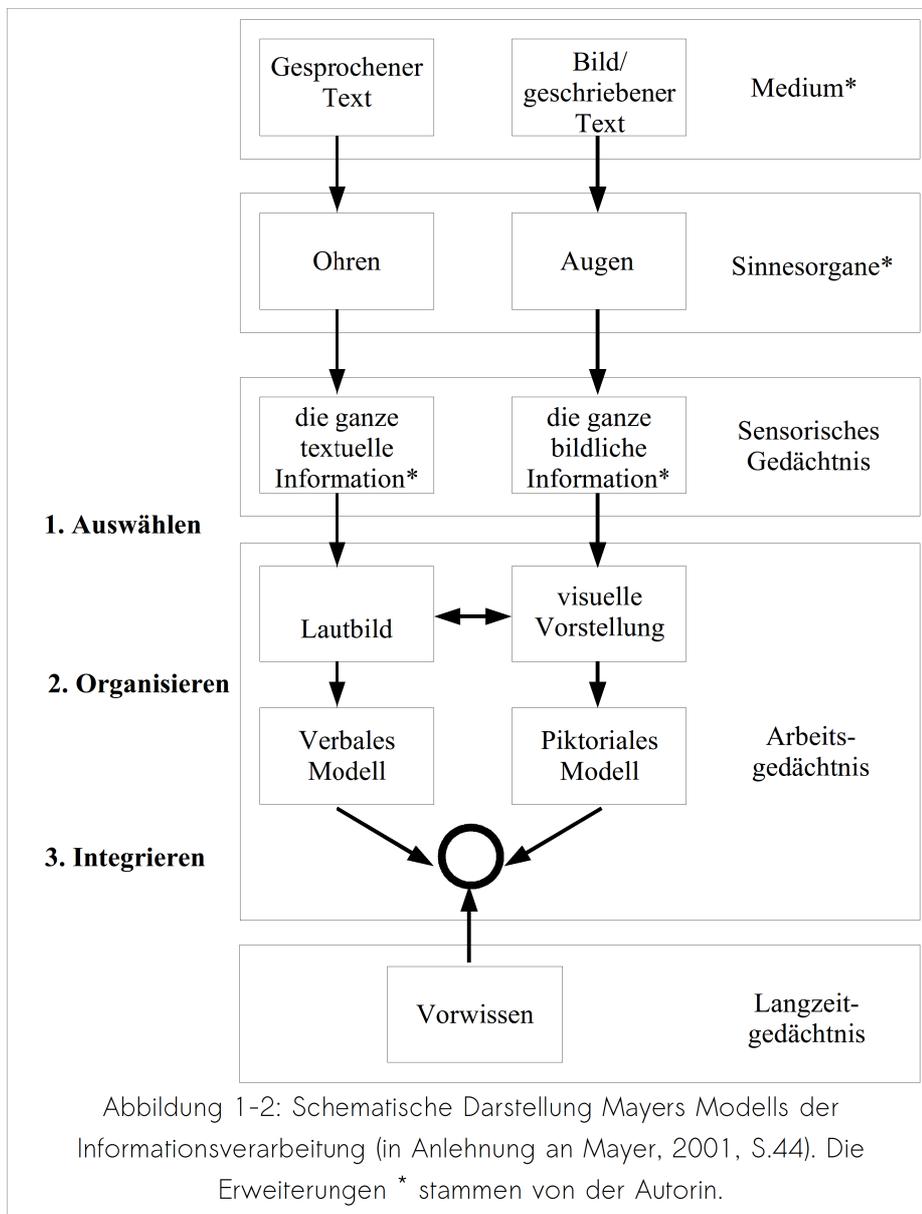
Das *germane cognitive load* (lernbezogene kognitive Belastung) ist zentral für das Lernen. Diese Art der kognitiven Belastung bezieht sich auf den Lernprozess selbst und auf die meta-

2 Doppelkanäle: Der verbreitete „Kanal“-Begriff stammt aus dem Ingenieursparadigma der Kommunikation. Für einen psychologischen Zugang ist „Verarbeitungssystem“ angemessener.

kognitiven Strategien. Sie beinhaltet einerseits also die Prozesse des Verarbeitens und Verstehens, andererseits die bewusste Steuerung des eigenen Lernprozesses (vgl. Mayer, 2001, S.50). Die Begrenztheit der Verarbeitungskapazität kann bei den Schülern eine Entscheidung erzwingen, welche der aufgenommenen Informationen beachtet werden kann. Da die Schüler durch diese kognitiven Aktivitäten lernen, wird *german cognitive load* als positive Belastung aufgefasst. Sie soll im Lernprozesses erhöht werden (Kramer, 2005, S.39).

3. Aktive Verarbeitung (*Active-Processing Assumption*, Mayer, 2001, S.50-62)

Die dritte Annahme in Mayers Theorie ist, dass der Lernende anhand seiner Erfahrungen eine kohärente mentale Repräsentation (z.B. Netzwerk von Propositionen) ausbildet, in dem er eine koordinierte Reihe folgender kognitiver Verarbeitungsprozesse durchführt (Abbildung 1-2):



- **Auswählen** (*Selecting*) relevanter Informationen.

Diese erste Phase entspricht der Wahrnehmung. Durch das Auswählen wird ein Teil der dargebotenen Information vom sensorischen Gedächtnis ins Arbeitsgedächtnis übergeführt. Zwischen externen und internen Repräsentationsformen besteht also keine eins-zu-eins-Zuordnung. Die internen Repräsentationen reflektieren Teile des dargestellten Gegenstands, statt eine genaue Kopie zu sein (Schnotz, 2002a, S.69). Ein textueller bzw. bildhafter Sinneseindruck wird den zwei Verarbeitungssystemen entsprechend in Form von Lautbildern³ bzw. visuellen Vorstellungen im Arbeitsgedächtnis erfasst. Es ist erstmal eine oberflächliche Verarbeitung, weil die Bezüge der Informationen untereinander noch nicht verstanden werden.

Die zwei Verarbeitungssysteme sind auf dieser Ebene miteinander verknüpft. Obwohl die Information durch einen Kanal aufgenommen wird, ist der Lernende fähig, die entsprechende mentale Repräsentation für die Verarbeitung in einen anderen Kanal umzuleiten. Wenn man z.B. das Wort „*Baum*“ hört, hat man gleichzeitig auch die visuelle Vorstellung eines Baumes (Mayer, 2001, S.45), vorausgesetzt, dass bereits eine visuelle Vorerfahrung im Langzeitgedächtnis gespeichert ist. Der Doppelpfeil ↔ in der Abbildung 1-2 zeigt die Umwandlung von einem verbalen Lautbild zu einer visuellen Vorstellung und umgekehrt. Diese Verknüpfung ist besonders wichtig bei der Verarbeitung von geschriebenem Text.

- **Organisieren** (*Organizing*) von selektierten Informationen in eine kohärente Struktur.

Im zweiten Schritt werden die Informationen der Text- bzw. Bildbasis im Arbeitsgedächtnis miteinander verknüpft. Das ist die eigentliche Sinnentnahme. Das Produkt dieser bewussten, semantischen Weiterverarbeitung sind die sogenannten verbalen und piktorialen mentalen Modelle. Das Wissen wird dabei zusätzlich so umorganisiert, dass es nicht nur die Sinnentnahme der dargebotenen Information unterstützt, sondern die entstandene Struktur die Verknüpfung mit dem Vorwissen erleichtert (vgl. Kramer, 2005, S.23). Nur diese mit dem vorhandenen Wissen verbundene Information lässt sich langfristig verankern. Der Prozess des Lernens findet also hier statt (Mayer, 2001, S.44).

- **Integrieren** (*Integrating*) von konstruiertem Wissen mit dem Vorwissen.

In der dritten Phase erfolgt auch eine Interaktion zwischen dem verbalen und visuellen Kanal. Der Lernende verbindet nämlich das verbale und piktoriale mentale Modell zu einem integrierten mentalen Modell. Darauf folgend wird das neue Wissen mit bestehenden Strukturen verknüpft. Das bedeutet, dass das integrierte mentale Modell auch Teile des Vorwissens enthält (Mayer, 2001, S.57). Der Lernende reichert dadurch seine Wissensstruktur an. Daher folgt, dass man den Text bzw. das Bild nicht unbedingt so versteht und sich nicht so daran erinnert, wie sie ursprünglich dargestellt wurden. Bei jedem Lernenden ist das Wissen durch unterschiedliche Assoziationen anders mit bestehenden Strukturen verbunden. Von einem einzigen objektiven Satz entstehen also mehrere subjektive Verknüpfungen, die das für die Person charakteristische Wissen ergeben.

3 *Sound images* von Mayer wurden von der Autorin als Lautbilder übersetzt.

In dieser Theorie werden also beide äußere Repräsentationen (Text und Bild) doppelt kodiert, d.h. eine mentale Multicodierung (Lautbild und visuelle Vorstellung) entsteht nicht nur bei der Verarbeitung von Bildern, sondern auch bei den Texten. Die Interaktion zwischen den getrennten verbalen und visuellen Verarbeitungssystemen erfolgt nach Schnotz erst auf der höchsten kognitiven Ebene (vgl. Schnotz & Bannert, 1999). Nach Mayer wirken die mentalen Repräsentationen schon auf der Oberflächenebene aufeinander. Im Folgenden wird die Terminologie von Mayer und Schnotz im Hinblick auf die externen und internen Repräsentationen verglichen:

- Die **externen Repräsentationen** können als Zeichenkombination aufgefasst werden, die einen bestimmten Code und eine bestimmte Modalität haben und außerhalb des Lerners existieren (z.B. gesprochene und geschriebene Texte, Bilder, Diagramme, Animationen).
- Die **internen Repräsentationen** sind innere, im Geist vorhandene Quasi-Objekte (vgl. Schnotz, 2002a, S.67). Sie entstehen beim Verstehen von Texten und Bildern. Wegen ihrer „Unbegreiflichkeit“ werden sie von Psychologen – wie oben beschrieben – modelliert und den Untersuchungsergebnissen entsprechend weiter verändert und differenziert.

Damit man sich in der Begrifflichkeit von Mayer und Schnotz besser orientiert, stellt die Tabelle 1-1 einen Überblick über die unterschiedlichen Ebenen der internen Repräsentationen dar. Für die leichtere Erkennung der Zugehörigkeit wurden die englischen Wörter in der Originalsprache gelassen.

Die Textoberfläche bzw. das Lautbild repräsentiert die gesamte sprachliche Information des Textes. Die propositionale Repräsentation bzw. das verbale Modell beinhaltet den semantischen Gehalt des Textes in Form von Propositionen⁴ und ihrer Verknüpfung. Sie ist also ähnlich zusammengesetzt, wie die Sätze der natürlichen Sprache. Sie wird im Gehirn zu einer mentalen Quasi-Sprache (Schnotz & Bannert, 1999, S.220; Kramer, 2005, S.25). Die visuelle Vorstellung bzw. *Visual images of pictures* hat eine konkrete Form der Übereinstimmung mit den Bildmerkmalen. Sie ist also ein wahrnehmungsnahes Abbild der externen bildlichen Repräsentation (Schnotz, 1999, S.36). In der Studie von Kosslyn (1994) hat sich gezeigt, dass „innere Bilder“ und tatsächlich Gesehenes zu einem verblüffend großen Teil in denselben Hirnregionen verarbeitet werden. Also unabhängig davon, ob die visuelle Vorstellung anhand einer externen Quelle (Bild) oder internen Struktur (Vorwissen) gebildet wurde, spielen sich dabei die gleichen Mechanismen ab.

4 Eine Proposition wird definiert in Anlehnung an Schnotz (2002, S.67) als kleinste sprachliche Bedeutungseinheit, die als selbständige Behauptung stehen kann.

Externe Repräsentation	Autor	Interne Repräsentationen	
		Oberflächenebene	Semantische und Modellebene
Text	Schnotz	Textoberfläche	Propositionale Repräsentation
	Mayer	<i>Sound images of words</i> (Lautbild)	<i>Verbal Model</i>
Bild	Schnotz	Visuelle Vorstellung	Mentales Modell
	Mayer	<i>Visual images of pictures</i>	<i>Pictorial Model</i>

Tabelle 1-1: Die Terminologie von externen und internen Repräsentationen in den Theorien von Schnotz und Mayer.

Obwohl die grafische Anordnung in der Darstellung des **mentalen Modells** bei Schnotz und Bannert (1999, S.222 und auch Tabelle 1-1) die gleiche Funktion wie das *Pictorial Model* bei Mayer suggeriert, hat der Begriff „mentales Modell“ bei beiden Wissenschaftlern nur eine ähnliche Bedeutung.

Bei Mayer liest man: „... the learner constructs what has been called a situation model – a coherent mental representation of a system in which the parts are related to one another in logical ways.“ (Mayer, 1997, S.5)

„A mental model (or knowledge structure) represents the key parts of the presented material and their relations.“ (Mayer, 2001, S.51)

„... when learners construct a coherent mental representation from the presented material; it is reflected in the ability to use the presented material in novel situations ...“ (Mayer, 2001, S.15).

Bei Schnotz findet man: „Ein mentales Modell hingegen ist ein internes Quasi-Objekt, das in einer Struktur- oder Funktionsanalogie zu dem dargestellten Gegenstand steht und diesen aufgrund bestimmter inhärenter Struktureigenschaften repräsentiert. Mentale Modelle sind eine sensorisch unspezifische Form der depiktionalen Repräsentation ...“ (Schnotz & Bannert, 1999, S.221).

Mayer betrachtet mentale Modelle als **entweder textuell oder bildlich** basierte Repräsentationen (*Verbal* bzw. *Pictorial Model*), die die zentralen Elemente und deren Beziehungen vom dargestellten Gegenstand wiedergeben. Weiterhin sind diese auf neue Situationen übertragbar. Die mentalen Modelle von Schnotz können **durch alle Sinnesorgane konstruiert** werden. Aus dieser neu entwickelten Struktur stammen weitere, im Text nicht vorhandene logische Folgerungen (vgl. Schnotz & Bannert, 1999, S.223). Mentale Modelle können weiterhin auch Sachverhalte repräsentieren, „die der Wahrnehmung nicht unmittelbar zugänglich sind“ (Schnotz, 1999, S.36). Abgesehen von dem unterschiedlichen „Ursprung“ weisen in beiden Theorien mentale Modelle eine abstrakte Form der Übereinstimmung mit dem Sachverhalt auf. Sie stellen also eine Art **Logik** dar, wovon auch **neue Informationen abgelesen werden**

können. In der Anlehnung auf diese Gemeinsamkeit des Begriffs in beiden Theorien, wird "mentales Modell" in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Im Bezug auf die mentale Modelle wurden im Wissenserwerb zwei verschiedene Verarbeitungstiefen festgestellt. Sie werden als Behaltens- und Transferleistung im empirischen Teil der Arbeit eine zentrale Rolle spielen (Mayer, 2001, S.15f, s. auch Abschnitt 8.3.4):

- Als **Behaltensleistung** wird die Fähigkeit bezeichnet, die Lerninhalte wiederzuerkennen und wiederzugeben. Dies kann geschehen, indem die Lernenden ein dem Sachverhalt entsprechendes mentales Modell konstruieren (*Remembering*).
- Die **Transferleistung** bezeichnet die Anwendung des erworbenen Wissens in neuen oder veränderten Kontexten. Hier können die Lernenden ihr mentales Modell nicht nur wiedergeben, sondern auch kreativ damit umgehen, d.h. das entwickelte mentale Modell auf neue Situationen übertragen (*Understanding*).

1.3 Lernförderliche Gestaltung medialer Angebote

Das Ziel des Medieneinsatzes besteht darin, eine optimale Informationsverarbeitung zu fördern, so dass die Lernenden ein dem Sachverhalt entsprechendes verbales/ piktoriales Modell entwickeln und die mentalen Modelle zu einem flexibel anwendbaren System vernetzen können. Die im vorigen Abschnitt 1.2 dargelegte Theorie beschreibt die Lernvorgänge so detailliert, dass sich auf ihrer Grundlage Leitlinien für die Gestaltung von Lernprogrammen festlegen lassen.

Der Fokus liegt auf der Reduktion von *cognitive load*, d.h. die Entlastung des Arbeitsgedächtnisses (vgl. Girwidz, 2004, S.16; Blömeke, 2003, S.62ff). Weitere negative Effekte wie die Spaltung der Aufmerksamkeit und die auftretenden Interferenzen (z.B. Verwirrungen der Lernenden) können durch Gestaltung und adäquaten Einsatz der Medien verhindert werden. Sie werden an entsprechenden Stellen in diesem Abschnitt thematisiert. Im Folgenden wird beschrieben, welche Art der kognitiven Belastung auf welche Weise verringert werden kann (Abbildung 1-3).

Für die Sinnentnahme (*Organizing*, die zweite Phase der kognitiven Verarbeitung, Abschnitt 1.2) muss man alle Informationseinheiten, die in ihrem Zusammenhang den Lerninhalt ergeben, gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis verarbeiten (vgl. Girwidz, 2004, S.16). Aus diesem Grund kann ein komplexer Lerngegenstand leicht zur intrinsischen kognitiven Überlastung (*intrinsic cognitive overload*) führen. In diesem Fall hilft es, wenn die Informationsdichte verringert wird. Das kann auf zwei Arten geschehen, einerseits nach dem *single concept principle*, andererseits nach dem Prinzip des individuellen Lerntempos:

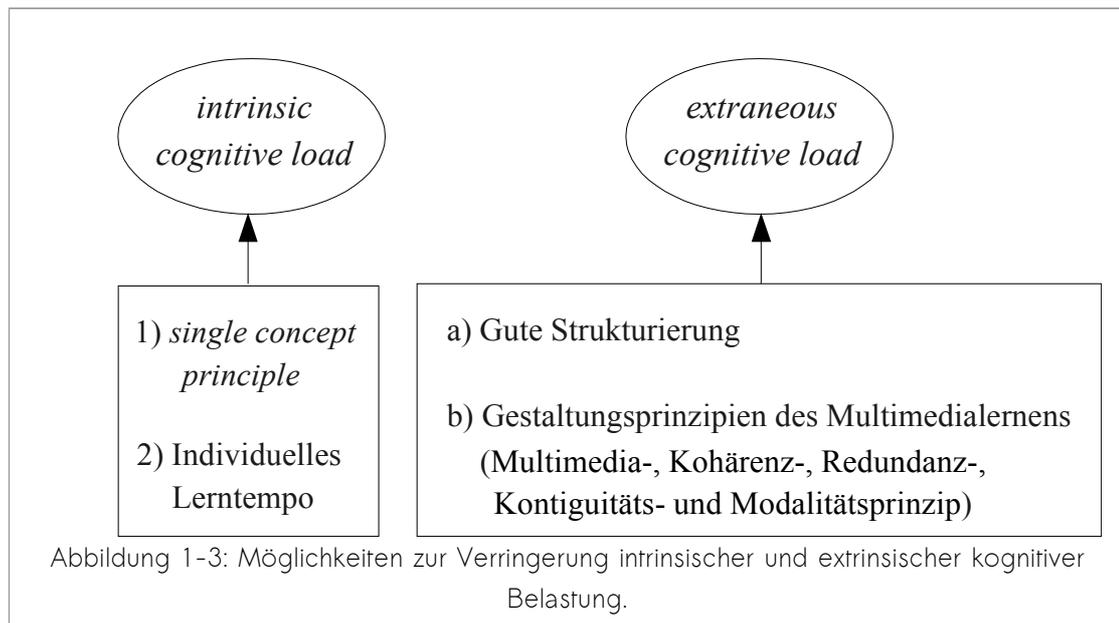
1) *single concept principle*

In diesem Ansatz wird der komplexe Inhalt sequentiell behandelt. Im Mittelpunkt steht immer nur ein Teilaspekt des Themas (Begriff oder Sachverhalt). Dadurch wird der Lernende ausrei-

chendes Vorwissen im Langzeitgedächtnis parat haben, um den Inhalt zu einem späteren Zeitpunkt in seiner Gesamtheit zu verstehen (vgl. Kramer, 2005, S.38f; Girwidz, 2004, S.16f).

2) Individuelles Lerntempo

Die freie Navigation ermöglicht die Steuerung des Ablaufs durch den Lernenden. Die Schüler können selbst entscheiden, wann sie zu einem neuen Inhalt übergehen. Sie tun das, wenn sie den alten schon verstanden haben, d.h. die Prozesse der Selektion und Organisation abgelaufen sind. Eine allzu frühe Präsentation aller Zusammenhänge könnte sie überfordern (Blömeke, 2003, S.64). Im Gegensatz dazu ermöglicht ein durch das eigene Lerntempo individualisierter Lernprozess das Verstehen komplexer Inhalte (Abschnitt 3.3, 7.3).



Der Lernprozess wird, neben anderen Einflussfaktoren, durch die Strukturierung und durch das Design des Mediums mitbeeinflusst. Eine ungünstige Gestaltung dieser Komponenten kann zur unerwünschten äußeren kognitiven Belastung (*extraneous cognitive load*) führen. Als Mediengestalter hat man daher Bedacht zu nehmen auf:

a) gute Strukturierung des Inhalts

Man hat die wesentlichen Begriffe und ihre Verbindungen hervorzuheben. Außerdem soll auf die wichtigen Inhalte vorab hingewiesen werden. Diese Hilfestellungen unterstützen die Prozesse der Selektion und Organisation bei dem Aufbau eines mentalen Modells (Blömeke, 2003, S.65).

b) Gestaltungsprinzipien des Multimedialernens

Die nachfolgend beschriebenen Prinzipien beruhen auf empirischen Befunden von Mayer und seinen Kollegen. Sie sind für Novizen (Schüler mit geringem Vorwissen) besonders hilfreich, denn leistungsstarke Lernende bzw. Experten können Mängel eines Lernangebots besser

kompensieren.⁵ Um die positive Wirkung der Gestaltungsprinzipien auf die Informationsverarbeitung zu zeigen, werden sie entsprechend der Reihenfolge der kognitiven Verarbeitungsprozesse (Auswählen, Organisieren, Integrieren; Abschnitt 1.2) beschrieben.

Multimediaprinzip (Mayer, 2001, S.78f): *Das Lernen mit Texten und Bildern führt zu höheren Behaltens- und Transferleistungen als das Lernen ausschließlich mit Texten.*

Mit Text und Bild wird umfangreichere Information über einen Sachverhalt in den kognitiven Apparat aufgenommen als ausschließlich mit Text. Diese doppelte Aufnahme und doppelte mentale Kodierung induziert einen Behaltensvorteil gegenüber einer reinen Textversion eines Lernangebots. Der Behaltensvorteil zeigt sich besonders nach einer längeren Zeitspanne zwischen Lernen und Wiedergeben.

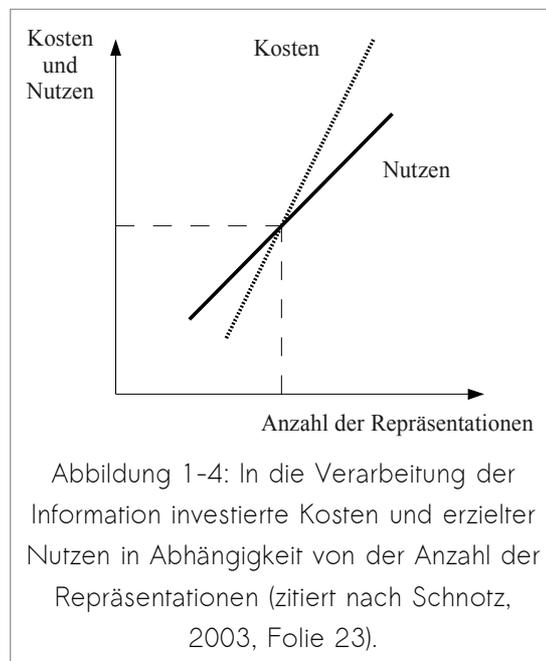
I. Der erste Schritt der aktiven Verarbeitung, das Auswählen (*Selecting*, Abschnitt 1.2), kann durch einfache, klare und sparsame Gestaltung unterstützt werden (Blömeke, 2003, S.63). Diese Anforderung ist im Kohärenz- und Redundanzprinzip enthalten:

Kohärenzprinzip (Mayer, 2001, S.132f): *Auf interessantes aber unwesentliches und unnötiges Material wird verzichtet.*

Ein üppiges Lernangebot verringert die freie mentale Kapazität im Arbeitsgedächtnis. Unwesentliche, irrelevante Informationen lenken in der Phase der Selektion die Aufmerksamkeit von den wichtigen Inhalten ab und behindern das Organisieren von Informationselementen. Es findet nur eine oberflächliche Wahrnehmung statt. Dies geschieht auch, wenn die Texte und Bilder, die eigentlich zum Lerngegenstand gehören, mehrfach vorkommen.

Es ist nur eine begrenzte Zahl der Repräsentationen lernförderlich. Ab einer bestimmten Anzahl ist die in die Verarbeitung investierte Energie höher als der Nutzen des Gelernten (kognitive Ökonomie, Schnotz, 2003, Folie 23). Die Abbildung 1-4 veranschaulicht diese Aussage (der Zusammenhang muss in der Wirklichkeit selbstverständlich keine lineare Funktion sein).

Eine erste Selektion soll also in der Außenwelt und durch den Autor stattfinden. Der Lernende wird dadurch keine überflüssigen Elemente ins Arbeitsgedächtnis überführen. Die lernfördernde Wirkung zeigt sich sowohl in der Behaltens- als auch in der Transferleistung. Zusätzliche Informationen, die anhand des Kohärenzprinzips im Text störend wirken, lassen sich mit neuen Medien gut darstellen (z.B. Hyper-Links).



⁵ Anfänger, Novizen und Experten unterscheiden sich im Hinblick auf ihr Faktenwissen und ihre Problemlösefähigkeit. Mit Novizen bezeichne ich im Folgenden Lernende, die über ein geringes Vorwissen verfügen. Sie sind jedoch innerhalb eines Gebietes keine Neulinge mehr. Experten wiederum verfügen über ein umfangreiches Wissen und spezielle Fähigkeiten in dem bestimmten Sachgebiet (siehe dazu Abschnitt 5.1).

Redundanzprinzip (Mayer, 2001, S.157ff): *Das Lernen mit Animationen und gesprochenen Texten führt zu höheren Lernleistungen als das Lernen mit Animationen, gesprochenen und zusätzlich gedruckten Texten.*

Auditiv und visuell dargebotene Texte werden durch verschiedene Kanäle aufgenommen, aber in höheren kognitiven Prozessen unterscheiden sie sich nicht wesentlich voneinander. Unterschiede zeigen sich jedoch im zeitlichen Verlauf der Informationsaufnahme. Sie erfolgt zeitlich selbstgesteuert bei schriftlichen Texten und zeitlich fremdgesteuert bei auditiv dargebotenen Texten (Schnotz, 2002a, S.70). Für die Übermittlung einer sprachlichen Information ist es also wesentlich besser, die schriftliche Form zu wählen.

Diese Überlegenheit des geschriebenen Texts wird fraglich, wenn das Multimediaprinzip von Mayer in der Präsentation beachtet wird. Die Aufmerksamkeit von Lernenden pendelt dann zwischen zwei visuellen Elementen (Text und Bild). Demzufolge ist der visuelle Kanal durch textliche und bildliche Information zugleich belastet. Wenn der Text dazu noch gleichzeitig auditiv angeboten wird, führt dies wahrscheinlich zu einer kognitiven Überlastung der Lernenden (Schnotz, 2003). Aus diesem Grund sollten Bilder und Prozesse nur mit gesprochenem Text erklärt werden; so bleiben mehr kognitive Ressourcen frei für die Verbindung von übereinstimmenden Bildern und Texten, sodass ein sinnvolles Lernen wahrscheinlicher wird (Mayer, 2001, S.158). Dem Redundanzprinzip folgend dürfen auch schriftliche Texte und Bilder präsentiert werden, dann verstößt man allerdings gegen das Modalitätsprinzip (siehe weiter unten).

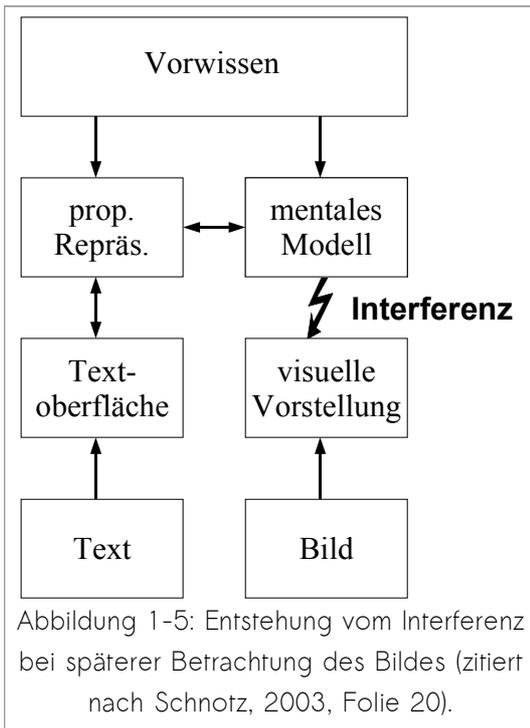
II. Die Strukturierung des Lernmaterials beeinflusst seine Verständlichkeit und wirkt sich auf die Strukturierung des Wissens (*Organizing*, Abschnitt 1.2) aus. Eine geeignete Strukturierung begünstigt die Generierung eines mentalen Modells. Dabei ist es wichtig, eine, dem folgenden Prinzip entsprechende Anordnung von Bildern und Texten zu gewährleisten (Sumfleth et al., 2002, S.127f):

Räumliches und zeitliches Kontiguitätsprinzip⁶: *Schüler lernen besser, wenn zusammengehörige Texte und Bilder räumlich nahe und gleichzeitig angeboten werden,*

d.h. die Bildbeschreibung soll unmittelbar dem Bild folgen (Mayer, 2001, S.95), weiterhin soll Multimodalität und -codalität der Darstellung zeitlich gut aufeinander abgestimmt sein (Schnotz, 2003). Der positive Effekt des räumlichen Kontiguitätsprinzips zeigte sich in Behaltens- und Transferleistungen von Studenten (Mayer, 2001, S.89-91). Die Anwendung des zeitlichen Kontiguitätsprinzips hat hingegen Lernvorteile nur im Transferbereich gebracht (Mayer, 2001, S.111).

Die positiven Wirkungen dieses Prinzips beruhen auf der leichteren Verknüpfung von zwei mentalen Repräsentationen, indem die virtuelle und reelle Suche nach passenden Inhalten reduziert wird. Es kommt dabei nicht zur Spaltung der Aufmerksamkeit (*split-attention effect*, Mayer, 2001, S.92; Brünken & Leutner, 2001).

6 Kontiguität bedeutet im Allgemeinen ein Zusammentreffen (lat. *contiguus*: berührend, angrenzend).



Dieses Prinzip hilft auch bei der Vermeidung von *Interferenzen* („*interference*“ heißt einfach Störung). Wenn der Text zuerst gelesen wird, bildet der Lernende seinem Vorwissen und dem Text entsprechend ein mentales Modell aus. Schwierigkeiten treten auf, wenn dazu später auch ein Bild gezeigt wird. Die auf dem Bild beruhende visuelle Vorstellung wird mit dem früheren mentalen Modell konfrontiert. Die Widersprüche können zur Verwirrung der Lernenden führen (vgl. Schnotz, 2003, Folie 19f). Diese Störung ist am Verarbeitungsschema in der Abbildung 1-5 veranschaulicht. Um solche Interferenzen zu vermeiden, ist es empfehlenswert die *Bilder vor dem Text zu präsentieren*. Dadurch können Bilder auch ihre motivationale, stimulative Funktion besser erfüllen.

III. Die effektive Nutzung der Sinnesmodalitäten erleichtert den letzten Schritt der kognitiven Verarbeitung, das Integrieren (*Integrating*, Abschnitt 1.2).

Modalitätsprinzip (Mayer, 2001, S.142f): *Es ist effektiver den Text zum Bild zu hören, als ihn zum Bild zu lesen und zwar sowohl für die Behaltens- als auch für die Transferleistung.* Wenn Bild und Text in visueller Form dargeboten werden, dann konzentrieren sich die Lernenden eher auf das dominierende Bild und vernachlässigen die textuelle Information (*split-attention effect*, Brünken & Leutner, 2001, S.364). Um den visuellen Kanal zu entlasten, soll der Text gesprochen sein, denn damit bleibt mehr Kapazität frei für eine intensivere Auseinandersetzung mit dem Bild. Eine Spaltung der Aufmerksamkeit und eine Überlastung des visuellen Kanals tritt auf, wenn Bild und multimodaler Text (visuell und auditiv) gleichzeitig präsentiert werden.

1.4 Der Einsatz von Lernprogrammen im Physikunterricht

Die in den vorangegangenen Abschnitten (1.2, 1.3) beschriebenen kognitionspsychologischen Modelle und Gestaltungsprinzipien besitzen einen so hohen Allgemeinheitsgrad, dass ihre Anwendung im schulischen Physikunterricht bzw. der fachdidaktische Nutzen noch erarbeitet werden muss (vgl. Mikelskis, 2004, S.108f). Folgende Einschränkungen bzw. Defizite der bisherigen Forschungsvorhaben und Rahmenbedingungen lassen die direkte Übertragung von kognitionspsychologischen Ergebnissen auf das schulische Physiklernen noch nicht zu (Starauscheck & Rabe, 2004, S.114f):

- In den psychologischen Untersuchungen werden Lernsequenzen von wenigen Minuten verwendet. Im Vergleich dazu ist ein schulisches Lernprogramm um das Vielfache länger;

- Als Gegenstand von Lernsequenzen dienen physikalische Inhalte, die curricular nicht immer verankert sind (z.B. Luftpumpe, Wetterkarten, ...);
- In den Testinstrumenten finden die für das Physiklernen zentralen Veränderungen von Schülervorstellungen keine Berücksichtigung;
- die Untersuchungen sind selten in den schulischen Unterricht eingebunden.

Die angesprochenen Kritikpunkte werden bei der Gestaltung des Lernprogramms „Die optische Abbildung mit der Lochkamera“ berücksichtigt, wie im Abschnitt 7.1 ausführlicher beschrieben wird. Die Schüler sind heutzutage mit der Nutzung des Computers so weit vertraut, dass eine grundsätzliche *computer literacy* angenommen werden kann (Wirth & Klieme, 2002, S.137). Insofern kann davon ausgegangen werden, dass fehlende Erfahrung mit dem Medium Computer nicht mehr den Lernerfolg beeinflusst. Im Folgenden soll zunächst darauf eingegangen werden, für welche Probleme des Physikunterrichts der Einsatz von Lernprogrammen neue Lösungsansätze versprechen kann. Da das Spektrum der Einsatzmöglichkeiten sehr breit ist, soll auf eine vollständige Auflistung in diesem Abschnitt jedoch verzichtet werden.

a) Unanschaulichkeit vieler physikalischer Grundbegriffe (z.B. elektrisches und magnetisches Feld, Lichtstrahl, Lichtausbreitung, Teilchenmodell)

Da diese Konzepte mit den Sinnen nicht direkt zu erfassen sind, tritt eine Verstehens-Schwierigkeit bei den Lernenden besonders stark hervor, wenn es um den zeitlichen Ablauf der mit diesen Begriffen verknüpften physikalischen Phänomene handelt (Euler & Müller, 1999). Die Unanschaulichkeit kann man mit Mayers Theorie so erklären, dass die Lernenden kein dem Sachverhalt adäquates mentales Modell aufbauen können. Abbildungen und Versuche (z.B. mit einer Magnetnadel das Feld „abtasten“) können zwar eine Hilfe darstellen, aber damit Lernende aus diesen Repräsentationen ein dynamisches mentales Modell konstruieren, ist noch große kognitive Anstrengung notwendig.

Eine multimediale Unterstützung bieten an dieser Stelle die **Animationen**, die Modellen eine Gestalt verleihen können. Wenn man solche bewegten Bilder in steuerbarer Form als Simulation einsetzt, bietet die Interaktivität weitere Lernvorteile. Da sich Kapitel 3 mit den Animationen auseinandersetzt, wird an dieser Stelle auf die nähere Betrachtung verzichtet.

b) „Zweisprachigkeit“ bzw. „Dreisprachigkeit“ der Physik

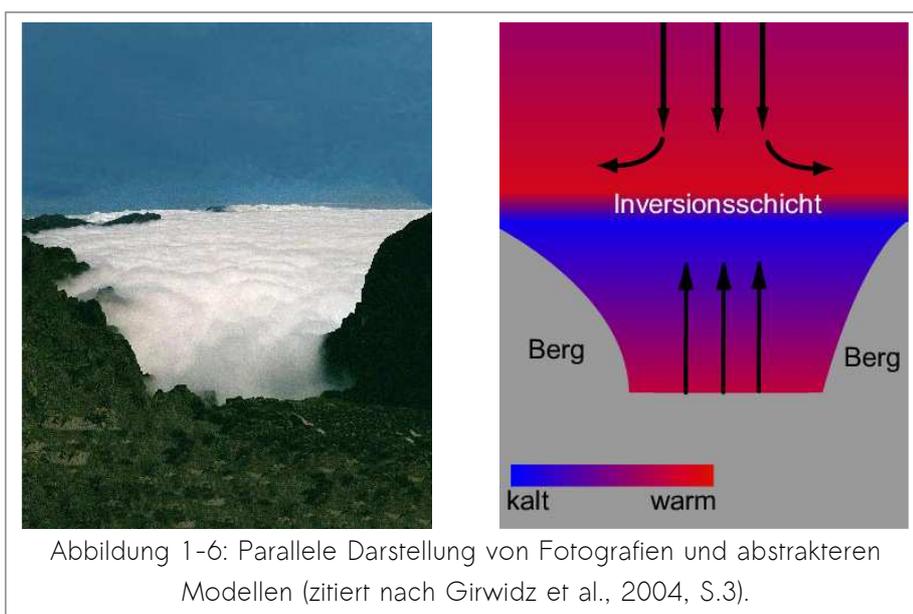
In der Physik werden viele Codesysteme benutzt, um die Prozesse in der Natur zu beschreiben. Die Übersetzung von der Alltagssprache in die Fachsprache (Wagenschein, 1988, S.137) und von der Fachsprache in die Sprache der Mathematik (Muckenfuß, 1995, S.251; Gerstberger, 1999) bereitet vielen Lernenden Schwierigkeiten. Die Aufgabe der Schüler ist dabei nicht gering: Sie sollen sich ein fachspezifisches Symbolsystem (die Zeichen für physikalische Größen), den nötigen mathematischen Apparat (z.B. Gleichungen aufstellen) und ein graphisches Repräsentationssystem (Diagramme) aneignen. Sie sollen dann die, in der Außenwelt wahrgenommenen visuellen und verbalen Informationen verstehen, mit ihrem Vorwissen integrieren und in den genannten fachspezifischen Systemen auch ausdrücken können (Euler & Müller,

1999). Um den Wechsel zwischen diesen Sprachebenen für die Lernenden zu erleichtern, ist eine bewusste Änderung der externen Repräsentationen empfohlen (Leisen, 1999). So kann unter anderem für die z.B. **parallele Darstellung multicodierter Inhalte** ein Lernprogramm eingesetzt werden (Girwidz, 2006, S.27f). Bei der Umsetzung dieses Vorhabens muss man auf die Gestaltungsprinzipien des multimedialen Lernens (Abschnitt 1.3) besonders achten, damit z.B. die Informationsdichte, und damit die kognitive Belastung nicht zu hoch wird (Kohärenzprinzip).

c) Entfernung bzw. Entfremdung von der Wirklichkeit

Sie tritt auf, wenn das Gelernte im Sinne von *L'art pour l'art* für sich steht. Physikalisches Wissen genügt sich nicht selbst; es soll in realen Situationen anwendbar sein. Das Ziel der fachdidaktischen Ansätze ist der Erwerb eines in realen Problemsituationen verfügbares Wissen. Es kann nur zustande kommen, wenn die Lernenden einen persönlichen Zugang zu dem dargebotenen Wissen finden. Es soll einerseits in ihrer Alltagswelt verankert sein (Girwidz, 2006, S.32), andererseits als mentale Simulation für Gedanken-Experimente bereit stehen (Schnotz et al., 1999, S.251).

Multimedia kann beispielsweise abenteuerliche Rahmenhandlungen bieten (*Physikus*) oder virtuelle Räume schaffen, in denen die verschiedenen Phasen des Lernprozesses stattfinden (*Co-Lab-Software*, Wünschler, 2004, S.96). Diese Lernumgebungen haben zwar eine motivierende Wirkung auf die Lernenden, aber sie tragen nicht viel zur Verbindung mit der Realität bei. Dies kann viel angemessener durch **parallele Darstellung von Fotografien** (z.B. eines physikalischen Experimentieraufbaus, einer Naturerscheinung) **und abstrakteren Modellen** erreicht werden (Abbildung 1-6). Das Lernprogramm *Virtuelle Kamera* (Rubitzko & Girwidz, 2005) stellt ein gutes Beispiel für diese Lösung dar. Ein anderes Beispiel der gleichen Autoren ist die **Überblendtechnik** (Rubitzko & Girwidz, 2004, S.3), mit der Fotografien von Naturerscheinungen schrittweise in schematische Zeichnungen überführt werden.



d) Geringe Kommunikation im Unterricht und infolgedessen geringe Nutzung der physikalischen Fachsprache

Lautes Sprechen des Schülers ist ein effektives Mittel um die aktive Auseinandersetzung mit dem Unterrichtsinhalt und die kognitive Verarbeitung von Informationen in Gang zu setzen (Staraschek, 2007, S.1). Dieses Potenzial wird leider im Physikunterricht nicht ausreichend ausgeschöpft: Im Klassengespräch liegt der Redeanteil der Lehrpersonen bei über 80% (Labudde et al., 2006, S.4) und dementsprechend reden die Schüler zu wenig. Es stellt sich die Frage, wie der Einsatz von Lernprogrammen die Kommunikation fördern könnte. Das folgende umfangreiche methodische Inventar wurde mit dem Computereinsatz kombiniert und seine Wirkung untersucht:

- Integration von Netzwerken, Videokonferenzen, Chatseiten usw. in den Lernprogrammen (Wünscher, 2004). Diese Kommunikation fördert zwar das Gefühl einer sozialen Eingebundenheit, aber die Lernenden werden nicht zum Sprechen gebracht.
- Formen des Monologs, wie lautes Denken und Selbsterklärungen. Hier versuchen die Lernenden den Inhalt eines Textes für sich selbst verständlich zu machen (Chi et al., 1994, S.439; Rabe, 2006; Staraschek, 2006a).
- Partner- oder Gruppenarbeit (Staraschek, 2007; Schanze, 2004; Berger & Hänze, 2004; Szabóné Várnai & Reinhold, 2006).

Die Studien zeigen, dass diese Kommunikationsformen mit dem Einsatz von Lernprogrammen fruchtbar kombiniert werden können, wobei auf eine angemessene kognitive Belastung geachtet werden muss. Eine passive Nutzung der physikalischen Fachsprache ist das Schreiben. Die Vorteile des Schreibens für den Lernprozess werden im Kapitel 4 erläutert.

Zusammenfassung

Die Schwierigkeiten, die beim multicodalen und -modalen Lernen auftreten (kognitive Überlastung, Spaltung der Aufmerksamkeit und Interferenzen), lassen sich reduzieren und unter Umständen sogar vermeiden. Dafür sind die folgenden Maßgaben relevant: Die Information soll auf beide Verarbeitungssysteme verteilt sein, d.h. unterschiedliche Codierungen (Text und Bild) sollen durch unterschiedliche Sinnesmodalitäten (visuell und auditiv) dargeboten werden. Dabei werden Text und Bild besser behalten, wenn hohe Kohärenz, räumliche und zeitliche Kontiguität und eine begrenzte Zahl von Repräsentationen (siehe Abschnitt 1.3) eingehalten werden.⁷

Da *extraneous* und *intrinsic cognitive load* durch die oben genannten Maßnahmen so weit wie möglich reduziert werden, können die frei gewordenen Ressourcen für die aktive kognitive Verarbeitung eingesetzt werden. Die freie Kapazität steht dann für die Wissenskonstruktion und metakognitiven Strategien (*germane cognitive load*) zur Verfügung. Diese aktive Verarbeitung kann weiterhin durch Instruktionen angeregt werden, die auf die jeweilige Lernsituati-

⁷ Diese Prinzipien sind in der naturwissenschaftlichen Fernsehsendung „Die Sendung mit der Maus“ weitgehend beachtet.

on abgestimmt sind (vgl. Zander & Brünken, 2006, S.15), wie z.B. durch die Aufforderung zur Anfertigung von Notizen, zur Partnerarbeit, etc.

Es ist zu beachten, dass jeder Schüler eine andere Kapazität und eine andere Art der Verarbeitung hat. Die achtsam optimierten Texte, Bilder, Animationen und Instruktionen (Kapitel 2 bis 4) sind nur eine Art Angebot. Sie können eine optimale Verarbeitung nicht vollkommen garantieren. Persönlichkeitsmerkmale der Schüler, die die Verarbeitung beeinflussen, werden im Kapitel 5 thematisiert.

2 Prinzipien der Bildgestaltung

„Begriffe ohne Anschauung sind blind.“

(Kant)

2.1 Einflussfaktoren der lernförderlichen Bildgestaltung

Die visuelle Gestaltung von Lernumgebungen ist eine wichtige Variable ihres Designs. So besteht eine grundlegende Entscheidung darin, ob man statische oder dynamische Bilder einsetzt, um größere Lerneffekte zu erzielen. Gerade bei den Novizen hängt die Qualität der gebildeten mentalen Modelle erheblich von den Bildmerkmalen ab. Bei Experten spielt das Lernmaterial eine geringere Rolle, da ihr ausgeprägtes Vorwissen eine optimale Nutzung erlaubt (Sumfleth & Telgenbüscher, 2000b, S.76). Auf die lernförderliche Gestaltung von Bildern und Animationen (Kapitel 2 und 3) wird deshalb in dieser Arbeit besonders Acht gegeben.

Zuerst sollen einige Besonderheiten von Bildern hervorgehoben werden. Bilder sind nach Schnotz (2002, S.66) ikonische Zeichen, die mit dem dargestellten Gegenstand in einer Struktur übereinstimmen. Dadurch stehen sie nahe zur visuellen Wahrnehmung der Realität (Objekte, Szenarien, usw.). Bilder zeichnen sich weiterhin durch folgende Eigenschaften aus:

- Sie lassen potentiell verschiedene Interpretationen zu. Ohne die Konkretisierung durch einen begleitenden Text können sie missverstanden werden (Ballstaedt, 1997, S.199);
- Die Deutung des Bildes ist unabhängig vom inhaltspezifischen Vorwissen des Betrachters. Die Vertrautheit des Betrachters mit der Codierungsform beeinflusst jedoch die Effektivität der Verarbeitung (Weidenmann, 2002, S.52);
- Sie werden als eine „Einheit“ simultan repräsentiert (Weidenmann, 2002, S.51).

Die erste und zweite Eigenschaft von Bildern lassen es sinnvoll erscheinen, Schülerinnen und Schüler über ihre Bildinterpretationen zu befragen (Abschnitt 7.5): Die Bildbeschreibung gibt Aufschluss darüber, ob die Botschaft der Autorin in der Bildgestaltung eindeutig umgesetzt wurde. Weiterhin kann in Interviews überprüft werden, ob die verwendete Codierungsform überhaupt zu entschlüsseln ist. Die dritte Eigenschaft von Bildern wird bei der visuellen Wahrnehmung berücksichtigt (Abschnitt 2.2).

Die Zielsetzung der Gestaltung ist, die Bildeffektivität zu erhöhen, d.h. den Wissenserwerb auf der visuellen Ebene zu unterstützen. Der Lernende wird zum Ausgangspunkt der Bildentwicklung. Die Beschreibung seiner kognitiven Verarbeitungsprozesse (Abschnitt 1.2) bildet einen wichtigen theoretischen Hintergrund für die **lernförderliche Bildgestaltung**. Die Frage „Was ist ein lernförderliches Bild für das Physiklernen?“ ist hinsichtlich der Fachdidaktik zentral. Dieser Frage wird im gesamten zweiten Kapitel nachgegangen. Zum Ausgangspunkt der Überlegungen haben sich vier wissenschaftliche Disziplinen als sinnvoll erwiesen: die

Wahrnehmungs- und Lernpsychologie, die Fachdidaktik und die Physik. Die Anwendung ihrer Forschungsergebnisse bildet eine solide Grundlage für die Bildgestaltung, sodass die visuellen Repräsentationen ausschließlich **theoretisch begründet und an gezielten Stellen** eingesetzt werden. An den folgenden Fragen wird deutlich, welche Disziplin mit welcher Sichtweise zum adäquaten Einsatz von Bildern (und Animationen⁸) in Lernmedien beitragen kann.

Wahrnehmungspsychologie (Abschnitt 2.2)

Wird die Absicht des Bildes durch die Art der Gestaltung unterstützt? Ist das Auffällige bzw. das Prägnante auch das Wichtige? Welche visuellen Eindrücke prägen sich besonders in das Gedächtnis ein?

Lernpsychologie (Abschnitt 2.3)

Nimmt die äußere kognitive Belastung (*extraneous cognitive load*) durch das Bild ab? Unterstützt die Darstellung die Entwicklung von (dynamischen) mentalen Modellen? Mit welchen Mitteln lässt sich die Aufmerksamkeit des Betrachters steuern? Motiviert die Darstellung zur Beschäftigung mit dem Inhalt?

Fachdidaktik (Abschnitt 2.4)

Wird durch die visuelle Repräsentation ein größerer Lernzuwachs oder eine kürzere Lernzeit erzielt? Unterstützt das Bild das fachdidaktische Ziel? Ist die visuelle Repräsentation den Lernenden, dem Lernmaterial und der Lernsituation angemessen? An welchen inhaltlichen Schlüsselstellen ist der Einsatz einer Darstellung sinnvoll? Ist das Bild an dieser Stelle hilfreich im Lernprozess? Wird das Bild der Absicht entsprechend interpretiert?

Physik

Ist die Darstellung dem physikalischen Inhalten entsprechend? Werden die physikalischen Inhalte eindeutig im Bild umgesetzt?

Diese Leitfragen können einerseits bei der Planung und dem Entwurf von Bildern, andererseits aber auch zur Beurteilung von Bildern herangezogen werden. Dabei sind die Fragen aus den Perspektiven der verschiedenen Disziplinen nicht isoliert zu betrachten. Aus ihrer Zusammenschau entstehen Fragen, die für die Bildgestaltung ebenso wichtig sind, z.B. „Unterstützen die perzeptuell dominanten bzw. prägnanten Stellen des Bildes den physikalisch zentralen Inhalt?“ „Wird eine Balance zwischen physikalischer „Richtigkeit“ und didaktischer Angemessenheit gefunden?“ Die Prinzipien für die Bildgestaltung werden in den einzelnen Abschnitten (2.2 - 2.4) hergeleitet. Als Ergebnis dessen entstehen Gestaltungsprinzipien (Abschnitt 2.5, Abbildung 2-21), die zur Grundlage der Bildentwicklung der vorliegenden Arbeit werden.

⁸ Die Fragen sind für Bilder formuliert, aber können auch auf Animationen übertragen werden.

Das Folgende soll als exemplarisches Beispiel dienen. Gestaltungsprinzipien werden generiert, indem man empirische Befunde auf eine Lernsituation überträgt. Es liegen z.B. drei Befunde vor (Bülthoff & Ruppertsberg, 2006, S.107, 113f):

a) Die Objekte sehen von unterschiedlichen Ansichten unterschiedlich aus, trotzdem wird erkannt, dass sie zum gleichem Objekt gehören. Dies wird dadurch möglich, dass wir Vorwissen über unsere Welt besitzen, die unsere Interpretationsmöglichkeiten drastisch einschränken.

b) Bekannte Objekte werden aus bestimmten Blickwinkeln schneller erkannt als aus anderen („kanonische Ansichten“).

c) Um Objekte mental zu rotieren benötigt man um so länger, je größer der Rotationswinkel ist. Je bekannter die Objekte sind, desto weniger gilt dieser strikte Zusammenhang.

Befund a) macht deutlich, dass die Gestaltung auf das Vorwissen von Schüler zurückgreifen soll. Befund b) spricht für kanonische Ansichten. Die Bekanntheit der Gegenstände und die Darstellung von Bildelementen in der kanonischen Ansicht lassen die Interpretationsschwierigkeiten der Schüler wegfallen. Dementsprechend sollten im Lernprogramm Alltagsgegenstände in kanonischen Ansichten gezeichnet werden. Aus Befund c) ergibt sich, dass die Präsentation drehbarer Objekte in einem Lernprogramm erst sinnvoll ist, wenn sie unbekannt sind.

2.2 Visuelle Wahrnehmung und die Gesetze des Sehens

Erkenntnisprozesse und Überlegungen beginnen oft mit Beobachtungen. Untrennbar mit Beobachtungen verknüpft sind die Sinneswahrnehmungen. Zwischen der visuellen Wahrnehmung und den Lernprozessen besteht genauso ein Zusammenhang: Erstere ist Voraussetzung für die Einleitung eines Lernprozesses (Barow, 1990). Was ist aber die visuelle Wahrnehmung? Wie funktioniert sie? Welche Erkenntnisse kann man durch ihr Verständnis für die Bildgestaltung gewinnen? In diesem Abschnitt wird versucht, Antworten zu diesen Fragen zu finden. Es sollen zuerst zwei Eigenschaften der visuellen Wahrnehmung erläutert werden:

I. Bei der visuellen Wahrnehmung findet keine „direkte Übertragung“ statt: Das Bild wird zwar simultan als eine „Einheit“ dargeboten, aber der Betrachter beachtet nicht die identische, vollständige „Einheit“.

Es ist zwar richtig, dass im Prozess der Wahrnehmung das sensorische Gedächtnis für sehr kurze Zeit die vollständige visuelle Information enthält, aber diese Stufe hat noch nichts mit der bedeutungsmäßigen Erschließung von Information zu tun. Es werden hier ausschließlich die Struktur und Gestalt von Informationen erfasst (Rohr, 1988, S.32). Die Sinnentnahme erfolgt in einem anderen Prozess, der im Abschnitt 1.2 unter „Organisieren“ beschrieben wurde. Das vollständige Bild im sensorischen Gedächtnis wird also nicht aktiv wahrgenommen, es wird nicht „gesehen“⁹. Es werden nur Teile der gesamten Information in das Arbeitsgedäch-

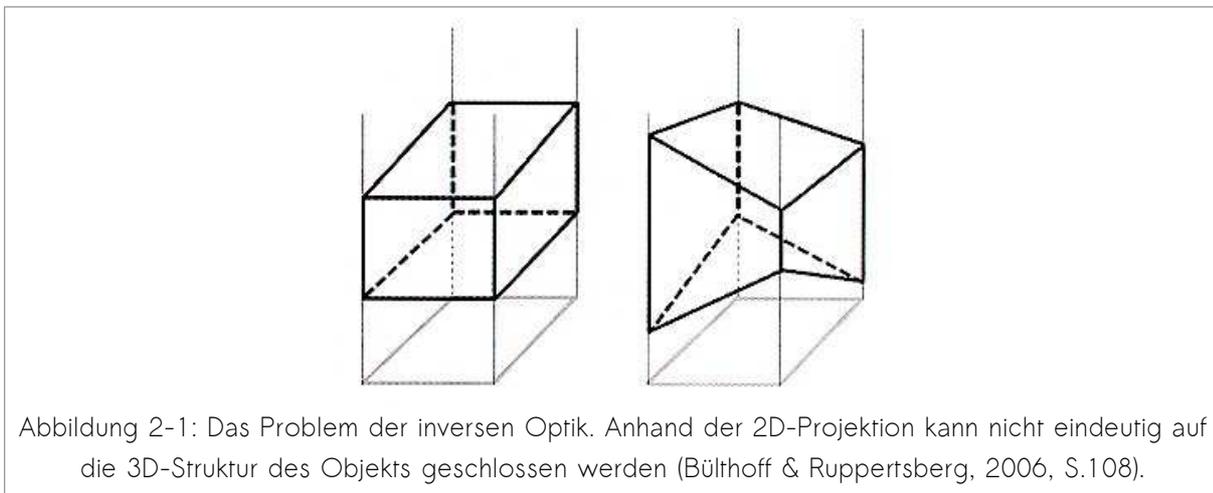
9 „Man schaut, sieht aber nicht./ Néz, de nem lát.“, wie das eine ungarische Redewendung ausdrückt.

nis überführt („Auswählen“) und erst hier werden die Inhalte bewusst wahrgenommen. Die Frage ist, welche wahrgenommenen Objekte aus dem sensorischen Gedächtnis mit größerer Wahrscheinlichkeit zum Arbeitsgedächtnis geleitet werden.

Somit ist die **visuelle Wahrnehmung als Interpretation des Gesehenen** zu deuten. Was als „Wahrscheinlichstes“ in der jeweiligen Situation weitergeleitet wird, entsteht anhand subjektiver und objektiver Aspekte. Den subjektiven Aspekt bildet die Individualität des Beobachters: Erstens seine angeborenen Dispositionen, Erfahrungen, Wissen und kulturelle Einflüsse (Kebeck, 1997, S.185f). Zweitens die motivationalen und emotionalen Aspekte, wie z.B. die individuellen Bedürfnisse, Interessen, Einstellungen und Motive (Kebeck, 1997, S.179). Drittens sein Bewusstseinszustand (Brennan, 1998, S.23f, Huxley, 1994). Der objektive Aspekt ist durch die Darstellung des Gegenstands bestimmt, er ist also für alle Beobachter gleich.

II. Unserem visuellen Systems kann eine „Übersetzungsfunktion“ zugeschrieben werden, indem von zweidimensionalen Bildern auf der Netzhaut eine dreidimensionale Struktur von Objekten als Wahrnehmung entsteht.

Aus der projektiven Geometrie weiß man, dass es unendlich viele dreidimensionale Objekte gibt, die die gleiche zweidimensionale Projektion liefern (Fucke et al., 1968, S.4ff; Abbildung 2-1). In dieser Hinsicht wäre das Interpretationsproblem für das Gehirn nicht eindeutig lösbar. Das Wahrgenommene wird aber mit vorhandenen Strukturen unbewusst verknüpft und aufgrund dieser Erfahrung bzw. dieses Wissens werden einfachere und kompakte Formen gegenüber unregelmäßigen geometrischen Körpern bevorzugt (Bülthoff & Ruppertsberg, 2006, S.108). Diese Eigenschaft des visuellen Systems wird in der Wahrnehmungspsychologie mit den Gesetzen der Einfachheit, der bekannten Figur und der Geschlossenheit beschrieben.



Bei den unbewussten Strukturierungsprozessen kann man also bestimmte allgemein gültige psychologische Gesetzmäßigkeiten erkennen, die Metzger (1975) als „Gesetze des Sehens“ (visuelle Wahrnehmungsgesetze) bezeichnet hat. Diese „Gesetze“ können zwar nicht mathematisch formuliert werden, ihr Einfluss ist jedoch so deutlich und stark, dass hier der Begriff „Gesetz“ übernommen wird. In der Folge dieser Gesetzmäßigkeiten wird die **Prägnanz** zu ei-

nem wichtigen Merkmal des visuell Dargebotenen. Da dieser Begriff sehr viel Verwirrung und Missverständnisse in der Wahrnehmungsforschung hervorgerufen hat (Kebeck, 1997, S.153) und in der Literatur nur unscharf definiert ist (Häcker & Stapf, 2004, S.725), wird in dieser Arbeit zugunsten einer pragmatischen Definition entschieden: „Prägnanz ist die Bezeichnung für optimale Abhebung und Gliederung eines Gebildes aus der Gesamtheit des visuell Gegebenen.“ Visuelle Eindrücke, die besonders schnell in den Vordergrund treten bzw. die im Blickfeld spontan auffallen, d.h. die perzeptuell dominant sind, werden also prägnant genannt.

III. Prägnante Objekte werden leichter ins Arbeitsgedächtnis überführt als „nichtprägnante“.

Diese selektierte Information steht dann zur weiteren Verarbeitung – Organisation und Integration – zur Verfügung. So führt die prägnante visuelle Wahrnehmung zum gewünschten Ablauf von Lernprozessen (Schmidkunz, 1983, S.361).

Die Gestaltung des Dargebotenen kann auch so „nichtprägnant“ sein, dass die einlaufenden Sinnesdaten sich beim Betrachter niemals zu Wahrnehmung und Erkenntnis herauskristallisieren können. Diese Gefahr im Hinblick auf das Lernen wird von Arnheim (1972, S.290) folgendermaßen ausgedrückt: „... wenn der Schüler nicht sieht, was er sehen soll, so fehlt ihm jede Grundlage für alles Lernen.“ Aus der Verbindung von dem didaktischen Interesse und wahrnehmungspsychologischen Erkenntnissen erschließt sich also ein grundlegendes Gestaltungsprinzip für das Lernprogramm:

Da prägnante Wahrnehmungen Lernprozesse begünstigen, sollen für das Lernen wesentliche Sachverhalte und Lerninhalte prägnant dargestellt werden.

Die Prägnanz der Darstellung hängt von mehreren Bildvariablen (Abschnitt 2.3) ab. Eine Möglichkeit sie in einem Bild zu realisieren besteht darin, die visuellen Wahrnehmungsgesetze anzuwenden. Die neun „Gesetze des Sehens“ kann man zu vier Darstellungsfunktionen zusammenfassen: die Gestaltung des Hintergrunds, der Figur, der Prozesse und der Gruppierung von Objekten. Sie werden im Folgenden beschrieben und anhand von Beispielen aus den gängigen Physikschulbüchern illustriert:

A) Hintergrund

1. Gesetz des Figur-Grund-Kontrastes

Das visuell Wahrgenommene gliedert sich in Figur und Hintergrund.

Das visuelle System besitzt die Fähigkeit, bestimmte Elemente als „Figuren“ aufzufassen bzw. zu organisieren und das übrige visuelle Feld als Hintergrund zu interpretieren (Kebeck, 1997, S.39). Im Fall von Kippfiguren (Abbildung 2-2) wechselt dagegen die Prägnanz von Figur und Grund ständig. Die Interpretation des Gesehenen (Wahrnehmung) wechselt spontan, obwohl sich das Abbild auf der Retina nicht geändert hat. In diesem Fall sind die sensorischen Daten nicht eindeutig zu interpretieren, was zu visuellen Illusionen führt (Bülthoff & Ruppertsberg, 2006, S.108f). Es reicht also nicht aus,

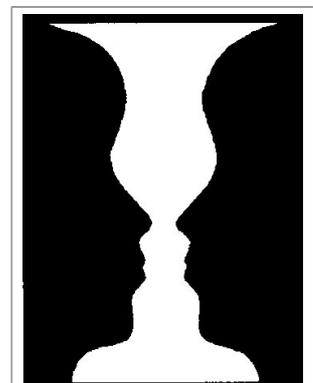


Abbildung 2-2:
Rubinsche Becher-figur
(Kebeck, 1997, S.40).

die Figur prägnant darzustellen, sondern auch die Umgebung muss die Prägnanz der Figur unterstützen.

Im Falle einer gleichartigen Beschaffenheit des Hintergrunds und der Figur, kann die Figur u.U. nicht gut erkannt werden, wie das Mädchen und ihre Handlung in der Abbildung 2-3a. Die weiteren Abbildungen zeigen, wie das Bild verbessert werden kann: Der Hintergrund wird in einem ersten Schritt homogenisiert und erscheint damit ruhiger und neutral (Abbildung 2-3b). Der Ballon und die Lampe werden in einem zweiten Schritt (Abbildung 2-3c) durch unterschiedliche Farben hervorgehoben. Damit sind die drei Figuren Schreibtischlampe, Ballon und Mädchen klar erkennbar: Das Mädchen reibt einen Ballon an der Lampe. Die Figur muss sich also klar und deutlich vom Hintergrund abheben. Dies wird mit folgenden Mitteln erreicht:

- Der Hintergrund muss homogen, neutral und farblich unauffällig beschaffen sein (Schmidkunz & Büttner, 1992, S.132).
- Um den nötigen Kontrast zu gewährleisten, wird für helle Bildelemente eine dunkle Hintergrundfarbe empfohlen; dunkle Bildelemente heben sich wiederum vor einem hellen, pastellfarbigen Hintergrund besser ab (Clausen & Büttner, 2006, S.120).



B) Figur

2. Gesetz der Einfachheit

Einfache Darstellungen werden von einem Betrachter besser erfasst als komplexe Figuren.

Weitere Argumente für Einfachheit finden sich im Abschnitt 2.3 und 2.4. Die Gestaltungsprinzipien für die Realisierung der Einfachheit sind im Abschnitt 2.3 unter „Aufmerksamkeit erhalten“ ausführlich beschrieben.

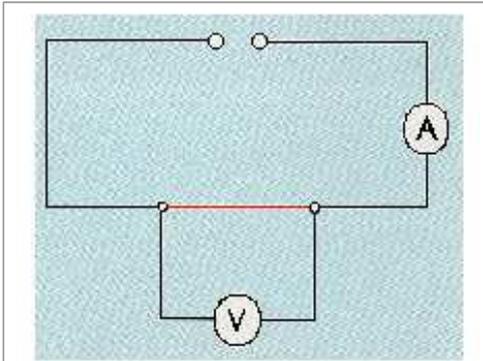


Abbildung 2-4: Bekannte Figuren in einer Schaltskizze (Mikelskis & Wilke, 2000, S.235).

3. Gesetz der bekannten Figur

Bekannte Figuren (Rechteck, Dreieck, Kreis, Ellipse und Figuren, die im täglichen Leben häufig vorkommen) werden schnell und als prägnanter visueller Reiz erfasst.

Dieser Gesetzmäßigkeit liegt das menschliche kognitive Verhalten zugrunde, alles Neue mit bereits vorhandenen Mustern im Gedächtnis zu assoziieren (Heege & Schmidkunz, 1997, S.62). Diesem Gesetz entsprechend sollte man bei der Bildgestaltung eine bekannte Figur anstreben, wie es in der Abbildung 2-4 der Fall ist: Die Schaltskizze besteht aus zwei Vierecken und zwei großen Kreisen. Da die Leitungen mit dünnen Linien gezeichnet sind, dominieren die Volt- und Amperemeter. Außerdem fällt der rot gezeichnete Draht auf, der einen Kurzschluss des Voltmeters verursacht.

zwei großen Kreisen. Da die Leitungen mit dünnen Linien gezeichnet sind, dominieren die Volt- und Amperemeter. Außerdem fällt der rot gezeichnete Draht auf, der einen Kurzschluss des Voltmeters verursacht.

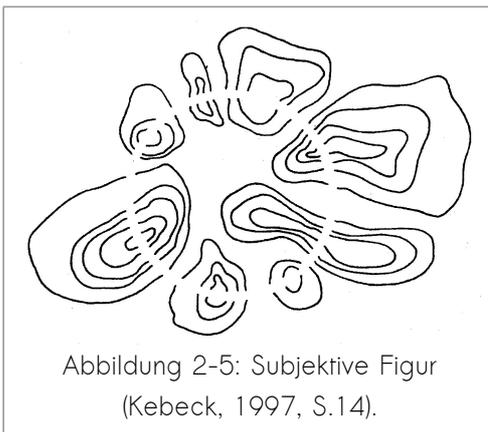


Abbildung 2-5: Subjektive Figur (Kebeck, 1997, S.14).

4. Gesetz der Geschlossenheit

Geschlossene Figuren führen zu einem prägnanten visuellen Reiz.

Selbst wenn die Geschlossenheit nicht mit einer durchgehenden Linie realisiert ist (Abbildung 2-5), werden diese Figuren erkannt. Hier zeigt sich die Befähigung des Gehirns zur Mustererkennung: Die Wahrnehmung visueller Strukturen neigt dazu, dem Wahrgenommenen eine bestimmte Bedeutung zuzuweisen. Im gezeigten Beispiel konstruiert das Gehirn eine Geschlossenheit, obwohl die zugehörige Reizgrundlage fehlt: Es wird ein weißer Kreis wahrgenommen.

eine Geschlossenheit, obwohl die zugehörige Reizgrundlage fehlt: Es wird ein weißer Kreis wahrgenommen.

C) Prozesse

Um Prozesse erkennbar darzustellen, muss das Auge den einzelnen Informationselementen ohne Schwierigkeit folgen können. Durch die Beachtung der folgenden zwei Gesetzmäßigkeiten bei der Visualisierung wird dies für den Betrachter erleichtert.

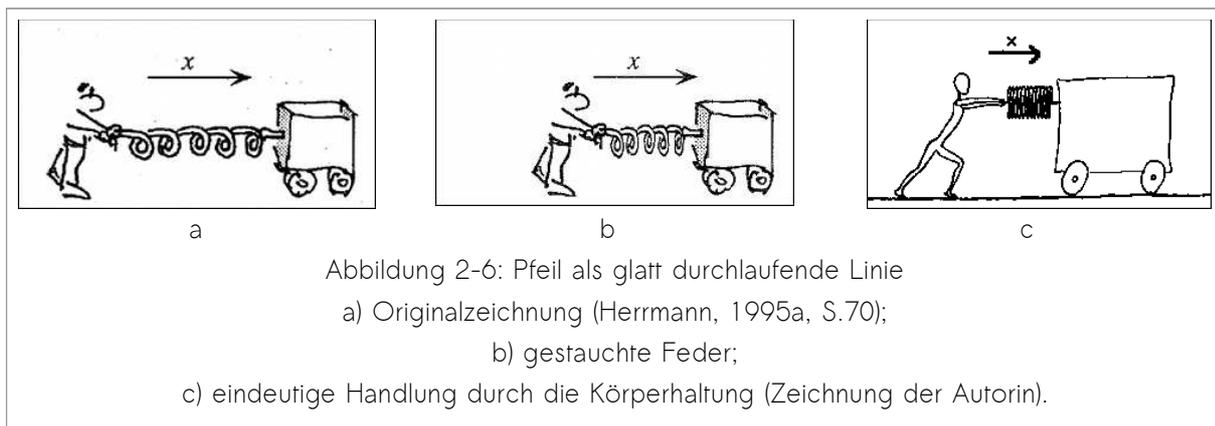
5. Gesetz der glatt durchlaufenden Linie

Glatt durchlaufende Linien, seien sie waagrecht oder senkrecht, sind besonders prägnante optische Reize.

- Diese „blickführende“ Funktion übernehmen oft die **Pfeile** in den Abbildungen. Die Verwendung von Pfeilen kann aber auch zu kognitiven Interferenzen (Abschnitt 1.3) führen, wenn die Pfeile gar keine Bewegung repräsentieren sollen, sondern als Achse eines Koordi-

nationssysteme nur eine Raumrichtung repräsentieren. Diese Aussage soll das folgende Beispiel illustrieren: In Abbildung 2-6a ist auf den ersten Blick nicht klar, ob das Männchen den Wagen zieht oder schiebt. Der Pfeil suggeriert eine Bewegung von links nach rechts. Sollte das Männchen den Wagen aber ziehen, würde dies zu Widersprüchen führen. Erst aus dem zugehörigen Text geht hervor, dass das Männchen den Wagen schiebt. Bei dem Pfeil handelt es sich um einen Richtungspfeil. Intuitiv hat der Zeichner alles richtig gemacht, intuitiv würde der Betrachter vermutlich ähnlich entscheiden, es bleibt aber eine Unsicherheit, die die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses zusätzlich belastet, da die Feder nicht gestaucht wirkt. Eindeutig ließe sich die Dynamik durch zwei Bilder und eine gestauchte Feder darstellen (Abbildung 2-6a und 2-6b). Oder man zeigt die Handlung des Männchens eindeutiger (Abbildung 2-6c).

- Die Aufmerksamkeit der Lernenden lässt sich mit Hilfe von durchlaufenden Linien steuern. Bei der Bildgestaltung einer Versuchsanordnung sollen dementsprechend die Geräte möglichst **geradlinig** aufgebaut sein, wenn der physikalische Sinn dies zulässt (Kebeck, 1997, S.155f).



6. Gesetz der Dynamik von links nach rechts

Ein Betrachter empfindet eine Bewegung von links nach rechts als naturgegeben und angenehm. Die umgekehrte Richtung wirkt dagegen störend. Dieses Gesetz ist aber nicht kulturell geprägt, wie z.B. das Schreiben und Lesen von links nach rechts, sondern wird durch die Lage des für die Wahrnehmung zuständigen Zentrums im Gehirn bestimmt (Schmidkunz, 2004, S.137). Werden in einem Bild verschiedene Zustände oder Zustandsänderungen (Bewegungen, Ursache-Wirkung, Prozesse) dargestellt, so sollten sich diese an dieses Wahrnehmungsgesetz anlehnen (Leisen, 2004, S.2).

In den Abbildungen 2-7 bestimmen die \vec{v} -Vektoren die Bewegungsrichtung. Die durchgezogene Linie, die Bewegungsbahn ist in dieser Hinsicht unbestimmt. Aufgrund dessen besteht in der Abbildung 2-7a ein Widerspruch zwischen dem gewohnheitsmäßigen Blickverlauf und Pfeilrichtung, der erst in der Abbildung 2-7b durch eine Spiegelung aufgehoben wird.

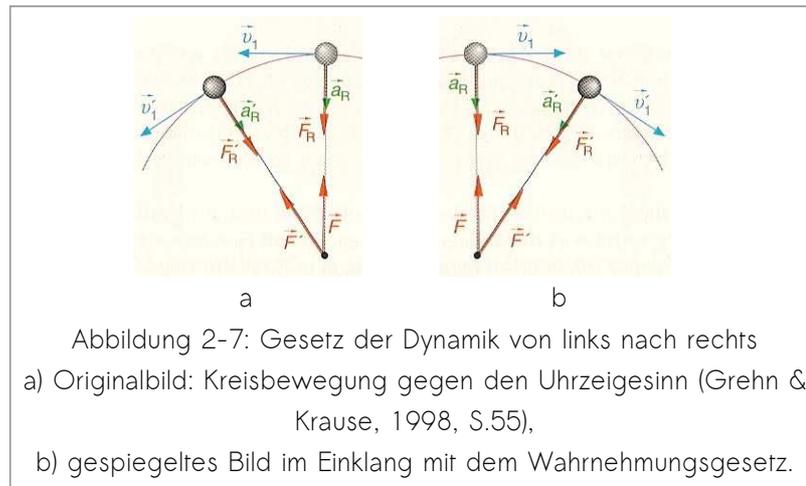


Abbildung 2-7: Gesetz der Dynamik von links nach rechts
 a) Originalbild: Kreisbewegung gegen den Uhrzeigersinn (Grehn & Krause, 1998, S.55),
 b) gespiegeltes Bild im Einklang mit dem Wahrnehmungsgesetz.

D) Gruppierung von Objekten

7. Gesetz der Symmetrie

Die optische Wahrnehmung bevorzugt symmetrische Formen.

Deshalb wirkt die **symmetrische Anordnung** der Bildelemente kapazitätsentlastend auf das Arbeitsgedächtnis (vgl. Kebeck, 1997, S.153). Durch die Symmetrie können viele Einzelteile in eine übersichtliche Anordnung überführt werden. Ein gutes Beispiel dafür ist Abbildung 2-8. In der realen Kernspaltung treten die Neutronen nicht unbedingt symmetrisch aus den Atomen heraus. Ihre symmetrische Darstellung ordnet die vielen Teilchen und fokussiert damit die Aufmerksamkeit auf die Blitzartigkeit der Kettenreaktion. In der Abbildung 2-9a wirken die Kreuzungen der Kabel verwirrend, ebenso ist der Hintergrund nicht homogen. Das Bild wird in der Abbildung 2-9b und 2-9c schrittweise verändert. In Abbildung 2-9b ist der Hintergrund homogen, weiterhin wird das zweitrangige Kabel entfernt und die Parallelschaltung durch unterschiedliche Farben herausgestellt. In Abbildung 2-9c ordnen wir die Bildelemente zusätzlich symmetrisch an. An diesem Beispiel zeigt sich wieder, wie sehr didaktische Entscheidungen letztendlich die Visualisierung bestimmen. Will man etwa das elektrische Potenzial unterrichten, so müssen die Gebiete hohen und niedrigen elektrischen Potentials und damit auch die Leitungen anders farblich markiert werden.

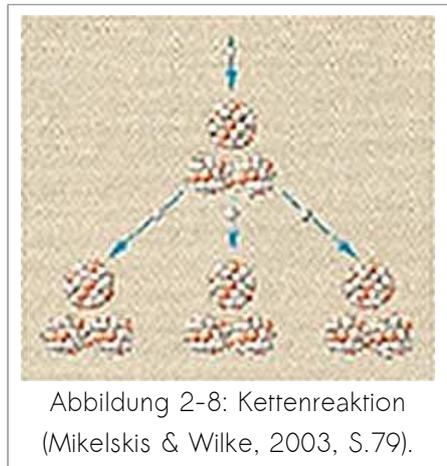
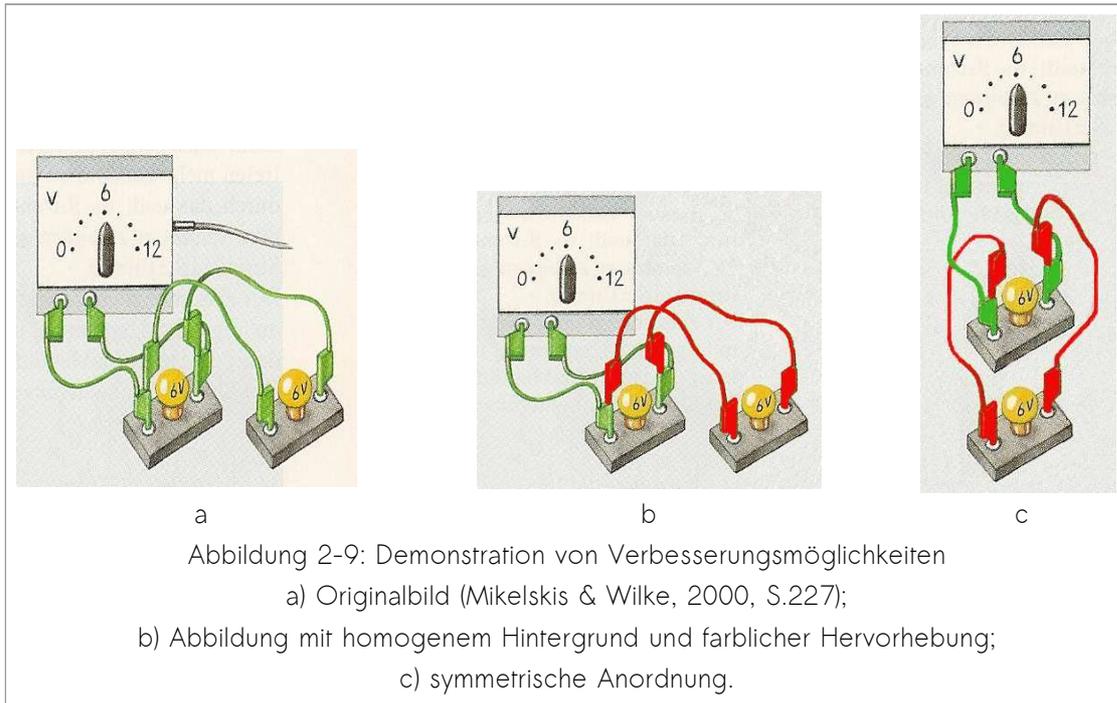


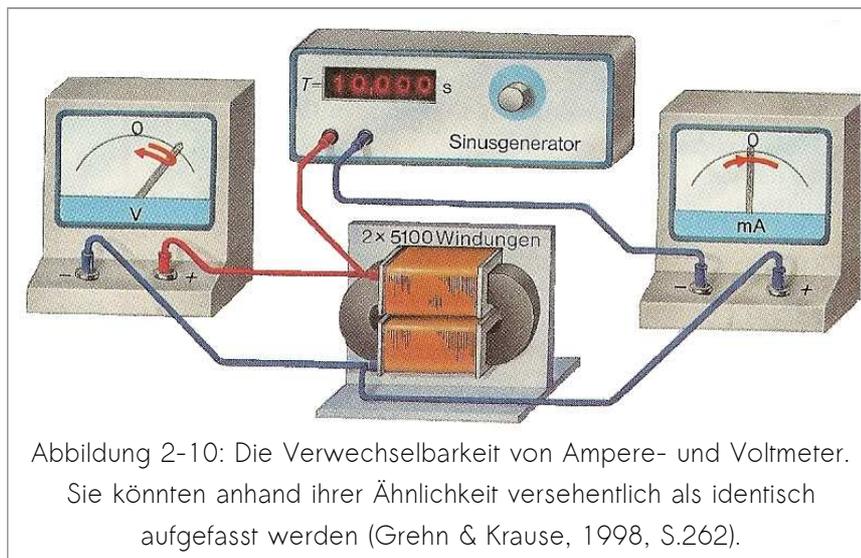
Abbildung 2-8: Kettenreaktion (Mikelskis & Wilke, 2003, S.79).



8. Gesetz der Gleichartigkeit oder Ähnlichkeit

Gleichartige Figuren werden als zusammengehörig empfunden. Die Gleichartigkeit kann sich auf die Form, die Größe, die Farbe und auf andere Gemeinsamkeiten beziehen (Seiffge-Krenke, 1981, S.22).

In der Abbildung 2-10 sehen Ampere- und Voltmeter gleich aus. Der einzige Unterschied liegt in den Buchstaben „V“ bzw. „mA“. Hier steckt eine Gefahr für den Lernprozess: ähnlichen Geräten und Aufbauten werden aufgrund ihrer Ähnlichkeit ähnliche Funktionen zugeschrieben. Ampere- und Voltmeter müssten demnach ein unterschiedliches Aussehen besitzen. Diese Forderung widerspricht jedoch den tatsächlichen Gegebenheiten. Demnach sind bei der Gestaltung eines Bildes zum Teil widersprüchliche Forderungen auszubalancieren.

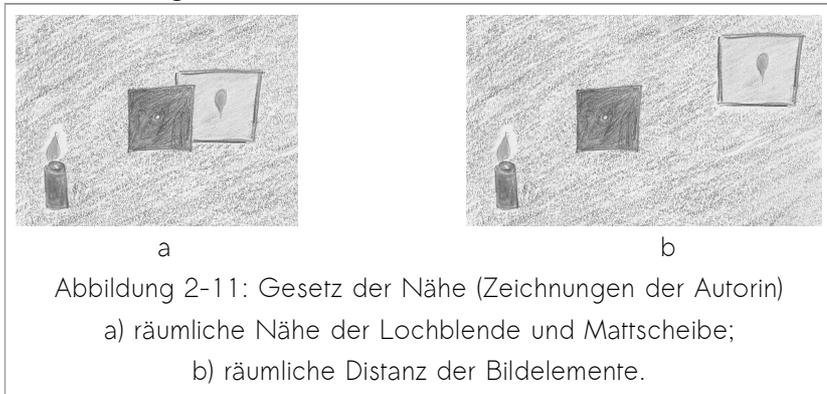


9. Gesetz der Nähe

Nahe beieinanderliegende Bildelemente werden als eine zusammengehörige Figur wahrgenommen (Kebeck, 1997, S.155).

Aus diesem Gesetz folgt auch, dass keine Geräte ohne Funktion in der unmittelbaren Nähe eines Versuchs stehen sollten (Schmidkunz, 1983, S.364f). Durch die räumliche Nähe oder Distanz graphischer Elemente kann die Verbindung oder Unterscheidung ihrer mentalen Repräsentationen induziert werden. Durch Nähe und graphische Verschmelzung werden Bildelemente, die bei graphischer Trennung als zwei optische Gruppen wahrgenommen wurden, zu einer optischen Gruppe (Abbildung 2-11):

Lochblende und Mattscheibe werden in Abbildung 2-11a als zusammengehörig empfunden, was unserer Absicht entspricht (Staraschek & Slančik, 2003b, I/ S.31). Wir haben die Lochkamera reduziert und stilisiert, indem wir sie auf ihre Hauptbestandteile in einem dunklen Raum beschränkt haben. In der Abbildung 2-11b werden wiederum Lochblende und Mattscheibe durch die räumliche Entfernung nicht mehr als eine Einheit empfunden. Die Anspielung an die Lochkamera verschwindet, dadurch wird die Assoziation „Lochkamera“ nicht oder eher selten bei den Schülern auftreten.



2.3 Lernpsychologisch angemessene Gestaltung

Aus lernpsychologischer Perspektive soll bei der Bildgestaltung auf die Verringerung der äußeren kognitiven Belastung, auf den Aufbau adäquater mentaler Modelle (Abschnitt 1.2) und auf die gezielte Steuerung der Aufmerksamkeit hingewirkt werden. Diese Ziele werden folgendermaßen angestrebt:

Einfachheit

Die so genannten Realismustheorien besagen, dass ein Bild umso anschaulicher ist, je mehr es der Wirklichkeit entspricht. Studien von Dwyer (1975, S.82f) haben hingegen gezeigt, dass der größte Lernerfolg mit schattierten Strichzeichnungen erreicht werden kann. Mit der kognitiven Lerntheorie sind diese Ergebnisse erklärbar. In einfachen Zeichnungen ist das Wesentliche hervorgehoben, wodurch sie die relevanten Informationen in klarer und reduzierter Form anbieten (Weidenmann, 2002, S.89). Strichzeichnungen erleichtern die Wahrnehmung und erfüllen eine Vermittlungsfunktion zwischen Realität und kognitivem Konzept (Weidenmann, 1994, S.530). Das zu vermittelnde Wissen ist dann zur Konstruktion von mentalen Modellen aufbereitet. Dadurch unterstützen sie die Lernenden bei dem Aufbau mentaler Modelle. Da einfache Darstellungen von den Schülern leichter wahrgenommen werden als komplexe Figu-

ren, lässt sich ihre Verwendung auch wahrnehmungspsychologisch begründen. Realistische, komplexe Bilder haben andere Vorteile: Sie sprechen Gefühle an, sie erfüllen eine Situationsfunktion und aktivieren damit Alltagserfahrungen (Weidenmann, 2002, S.86f). Deshalb werden sie vom Betrachter gerne angesehen. Aber dies bedeutet nicht notwendigerweise einen größeren Lernerfolg (Peeck, 1994, S.81). Die Detailfülle bringt einen Informationsüberschuss mit sich (Ballstaedt, 1997, S.227) und erhöht so die äußere kognitive Belastung. Eine Metaanalyse von Höffler und Leutner (2005, 9. Folie) setzt sich ebenfalls mit dem Grad des Realismus von Bildern auseinander. Die Analyse zeigt, dass die Effektstärke bei Untersuchungen mit einfachen Zeichnungen signifikant höher als bei realistischen Abbildungen ist. Die generelle Behauptung „realistische Bilder sind besser als einfache“ lässt sich nicht halten. Aufgrund des kleinen Stichprobenumfangs lässt sich aber auch die Umkehrung der Aussage „einfache Bilder sind besser als realistische“ nicht behaupten. Damit ist die Aussage „realistische Bilder sind nicht zwingend besser als einfache“ korrekt. Es gibt also keine einfache Ja-Nein-Entscheidung für die Verwendung realistischer Bilder. Da Lernpsychologie und Fachdidaktik an dieser Stelle nicht strikt getrennt werden können, werden weitere Argumente für die Einfachheit der Bilder unter dem Punkt „Merkmale der Lernenden“ im Abschnitt 2.4 aufgeführt.

Konsistente Gestaltung

Zeichnungen sollen möglichst nur von einer Person mit einem einheitlichem Codesystem angefertigt werden. Das bedeutet, dass die gleichen Gegenstände, Anordnungen, Farben immer identisch erscheinen, sodass man keine kognitiven Ressourcen in die Wiedererkennung investieren muss. Dadurch wird die äußere kognitive Belastung verringert. Da die Zeichnungen von nur einer Person stammen, ändert sich der Stil der Bilder nicht. Eine Veränderung der Bildvariablen (räumliche Anordnung, Farbe, Anzahl der Elemente) kann nur durch die Einbeziehung einer neuen inhaltlichen Information bedingt sein.

Bekannte Bildelemente

Bildelemente, die für die Schüler bekannt sind, vermitteln nur durch ihre neue, ungewohnte Anordnung neue Information. Dadurch unterstützen sie die Integration von neuem Wissen mit bestehenden Vorstellungen. Auf diese Weise wird die äußere kognitive Belastung von Schülern verringert.

Farbcodes

Außer ihrem visuellen Anregungsgehalt können die Farben auch eine lernpsychologische Funktion erfüllen. In diesem Fall werden sie als Organisationshilfe einem bestimmten Gegenstand bzw. Phänomen zugeordnet. Des Weiteren wird dieser Gegenstand im Lernmedium durchgängig mit einem Farbcode gezeichnet. Dieses Verfahren verbessert das Behalten, weil er einfache Verarbeitungsprozesse wie Suchen, Wiedererkennen, Vergleichen und Gruppieren unterstützt (Ballstaedt, 1997, S.245f). Die Wahrnehmung der Farbenprächtigkeit der Bilder kann jedoch auch zu viele kognitive Ressourcen in Anspruch nehmen. In der Software-Ergonomieforschung sind acht bis zehn Reizstufen der Farben angegeben, die die Benutzer noch

unterscheiden können (Bauer-Wabnegg & Krause, 2003, S.10). Ballstaedt (1997, S.246) gibt eine maximale Anzahl von fünf bis sieben Farbcodes in einem Bild an. So wird gewährleistet, dass die Schüler kognitiv nicht überfordert werden. Im Fall einer Farbenfehlsichtigkeit, was in 99% der Fälle eine Rot-Grün-Sehschwäche ist, wird die Farbwahrnehmung wiederum beeinträchtigt. Bei dieser angeborenen Krankheit können die Betroffenen (etwa 9% aller Männer und etwa 0,8% der Frauen) die Grundfarben Rot und Grün gar nicht bzw. kaum unterscheiden. In der Schule sind also vor allem Jungen betroffen (Clark, 1992, S.257). Die Farbcodes von Bildern sollten also daraufhin geprüft werden, ob die Kontraste zwischen den Farben stark genug sind. Weiterhin sollten die Bildelemente mit klaren Konturen gezeichnet werden, damit auch farbenfehlsichtige Schüler von farbigen Bildern profitieren können.

Exkurs: Aufmerksamkeit

Da die Aufmerksamkeit der Schüler eine Voraussetzung dafür ist, dass Lernen stattfindet, wird dieser Schlüsselbegriff in diesem Abschnitt näher erläutert. In der Wahrnehmungspsychologie wird die Aufmerksamkeit als ein systematischer Such- und Steuerungsprozess angesehen. Sie bedeutet „vor allem eine **gezielte Selektion** der Informationen, die zu Inhalten der bewussten Wahrnehmung werden sollen“ (Kebeck, 1997, S.157). In diesem Sinne bestimmt die Aufmerksamkeit, welche Teile der Information weiter verarbeitet werden können, was für den Lernprozess entscheidend ist. Die Prozesse dieser gezielten Selektion erfolgen nicht „zufällig“. Sie unterliegen einerseits der willentlichen Steuerung (Müller & Krummenacher, 2006, S.245), andererseits laufen sie unbewusst bzw. reizgesteuert ab (Abschnitt 2.2, Punkt I-III).

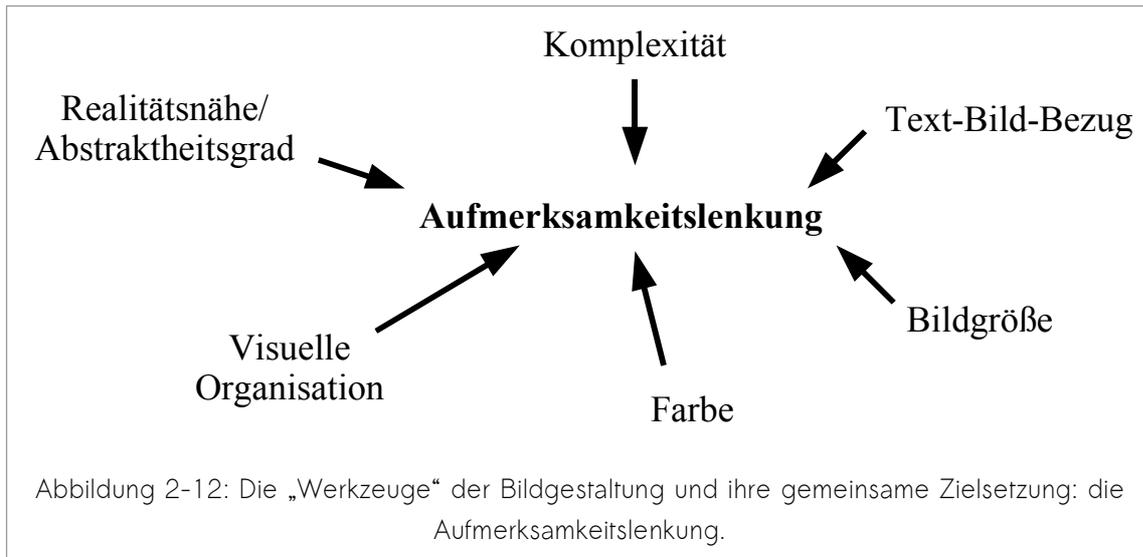
Der **bewusste Anteil der Selektion** orientiert sich an den in der jeweiligen Situation bestehenden Erfordernissen und Interessen (Kebeck, 1997, S.159). Dadurch „sieht jeder in einem Bild das heraus, was ihn besonders betrifft“ (Ballstaedt, 1997, S.214).

Den **unbewussten Anteil der Selektion** von optischen Reizen bilden Strukturierungsprozesse. Diese unbewussten Prozesse bieten die Ansatzpunkte zur Steuerung der Aufmerksamkeit. Die Aufmerksamkeit ist demnach beeinflussbar: die Prägnanz der Darstellung (Abschnitt 2.2, „Gesetze des Sehens“) und andere Bildvariablen (Farbe, Größe, Komplexität, visuelle Organisation) haben einen wesentlichen Einfluss darauf, was als wichtig empfunden wird. So bildet die Steuerung der Aufmerksamkeit einen zentralen Teil der Lernprozesssteuerung. Passt man die Prägnanz und andere Bildvariablen an die physikalisch relevanten Inhalte an, so ergibt sich ein lernförderliches Bild.

In der Bildgestaltung wird weiterhin versucht, eine **geteilte Aufmerksamkeit zu vermeiden**. Zwar erlauben bestimmte Tätigkeiten eine parallele Verarbeitung (z.B. Radfahren und gleichzeitig Gespräche führen), aber in der vorliegenden Arbeit wird nicht auf solche „automatisierten“ Prozesse fokussiert. Da die (Text- und) Bildverarbeitung eine bewusste Zuwendung erfordert, wird davon ausgegangen, dass zu einem Zeitpunkt nur jeweils eine Wahrnehmungs- oder Verarbeitungsaufgabe durch eine Sinnesmodalität verfolgt werden kann. Ein weiteres Argument dafür liefern die Prinzipien des Multimedialernens (Abschnitt 1.3).

Steuerung der Aufmerksamkeit

Die Aufmerksamkeit kann man wecken, steuern und erhalten. Mit der Bildgestaltung wird auf diese Prozesse Einfluss genommen, indem man die einzelnen Variablen bzw. „Werkzeuge“ der Bildgestaltung bewusst einsetzt. Die Abbildung 2-12 soll als vorangestellte Organisationshilfe dienen, die die wichtigsten Bildvariablen zusammenfasst. Der optimale Einsatz dieser Bildvariablen wird bei der jeweiligen Methode der Aufmerksamkeitslenkung thematisiert. Diese Methoden sollen helfen, die Bildauswertung für den Beobachter zu erleichtern.



Die visuelle Organisation umfasst Bildausschnitt, Blickwinkel, räumliche Darstellung (zwei- oder dreidimensional), die räumliche Anordnung von Bildelementen, sowie die Gestaltgesetze der Wahrnehmungspsychologie (Abschnitt 2.2). Die Gegenüberstellung von Realitätsnähe vs. Abstraktheit ist wahrnehmungspsychologisch motiviert. Der Übergang zwischen den Gegensätzen ist kontinuierlich und von zunehmender bzw. abnehmender Komplexität gekennzeichnet. Da Bilder unterschiedlich interpretiert werden können, bedürfen sie einer sprachlichen Verankerung im Text, darüber hinaus kann das Sehen durch den Text sprachlich beeinflusst werden (Abschnitt 2.4). Mit dem Einsatz von Bildern kann man wiederum auch auf bestimmte Inhalte im Text aufmerksam machen. Aber die Steuerung der Aufmerksamkeit erfolgt auch innerhalb eines Bildes. Diese Methoden der Aufmerksamkeitslenkung werden im Weiteren vorgestellt. Die Darstellung ist angelehnt an das Buch „Wissensvermittlung. Die Gestaltung von Lernmaterial.“ von Steffen-Peter Ballstaedt (1997), wo wesentliche praxisorientierte Beiträge für die visuelle Kommunikation beschrieben sind. Durch gelungene Steuerung der Aufmerksamkeit kann, unter anderem, die äußere kognitive Belastung verringert werden.

a) Blickzuwendung erreichen

Die Grundvoraussetzung für die Bildverarbeitung ist, dass das Bild im Text überhaupt angeschaut wird. Diese allgemeine Aufmerksamkeit bzw. das Interesse kann man mit folgenden Mitteln erreichen (Ballstaedt, 1997, S.214, 223, 230f, 244; Weidenmann, 1994, S.523):

- Pop-out-Effekt: durch das Gegenteil (in der Farbe, Größe, Orientierung, ...) auffallen;
- visuelle und kognitive Inkonsistenzen, z.B. originelle, überraschende Ansichten; grelle, ungewohnte Farben; unerwartete oder nicht passende Bildelemente;
- Humor;
- Farbige Abbildungen: sie werden als interessanter und anregender eingeschätzt als ihre schwarz-weiß Versionen.

Die ersten drei Mittel stellen eine spezifische Art der Bildgestaltung dar, die dazu dient, den Anregungsgehalt der Bilder zu erhöhen. Sie sind in der Fachdidaktik nur begrenzt nutzbar, wobei man nicht vollständig auf eine unterhaltsame Informationsdarstellung verzichten sollte – die Wissenschaft verliert durch Humor nicht ihre Glaubwürdigkeit. Die kognitive Inkonsistenz bietet neben der Blickzuwendung noch einen weiteren Vorteil: das Bild wird zu einer Herausforderung für den Beobachter und löst dadurch eine intensivere Auseinandersetzung aus (Weidenmann, 1994, S.515). Die farbigen Abbildungen sind eine unspezifische Art der Stimulation, mit der die Aufmerksamkeit erregt und erhalten werden kann. Dabei ist es wichtig, dass die Farbe nicht willkürlich eingesetzt wird, sondern eine Funktion übernimmt (Weidenmann, 1994, S.527), wie der oben beschriebene Farbcode.

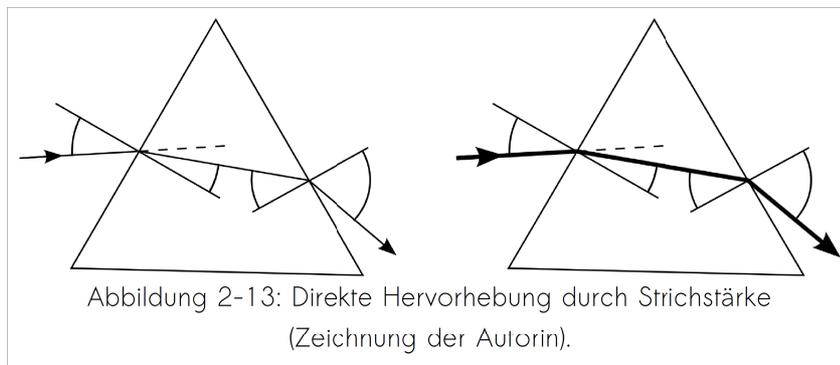
Unter der Annahme, dass die erste Blickzuwendung erfolgt ist, sollen die folgenden Stufen der Aufmerksamkeitslenkung helfen, das Bildangebot optimal zu bearbeiten. Die Mittel der Gestaltung sind bei Schnotz (2002, S.89) unter „Steuerungscode“ aufgeführt.

b) Visuelles Hervorheben

Diese Methode soll die Wahrnehmung des als relevant definierten Bildinhalts sichern. Damit spielt sie bei der Selektion der Information eine große Rolle. Im Mittelpunkt steht die Frage, worauf der Blick zuerst fällt. Die Aufmerksamkeit soll auf eine bestimmte Stelle bzw. ein bestimmtes Objekt des Bildes fokussiert werden. Die **direkten Mittel** des Hervorhebens sind dann (Ballstaedt, 1997, S.232f):

- Signalfarbe: eine auffällige Farbe in farbloser oder natürlich gefärbte Umgebung. Die Signalfarbe erhöht das Behalten der hervorzuhebenden Information, weil sie die selektiven Verarbeitungsprozesse unterstützt, mit denen die Lernenden die wichtigsten Inhalte finden. Sie darf nur sparsam eingesetzt werden, damit ihr positiver Effekt nicht nachlässt;
- Hinweis- und Bewegungspfeile: sie zeigen auf relevante Details;
- Lupe: den Ausschnitt, wo wichtige Details sich befinden, vergrößert darstellen;
- Strichstärke: bei optimalem Leseabstand reagiert das Auge auf Striche von (0,73-1,1) mm am empfindlichsten. So lassen sich Hauptelemente von dünn gezeichneten (0,15-0,25) mm untergeordneten Elementen des Bildes unterscheiden (Abbildung 2-13);
- Unterlegen: eine künstliche Figur-Hintergrund-Trennung schaffen.

Da die direkten Mittel des visuellen Hervorhebens sehr auffällig sind, gilt: *immer nur ein Mittel einsetzen und dieses sparsam verwenden.*



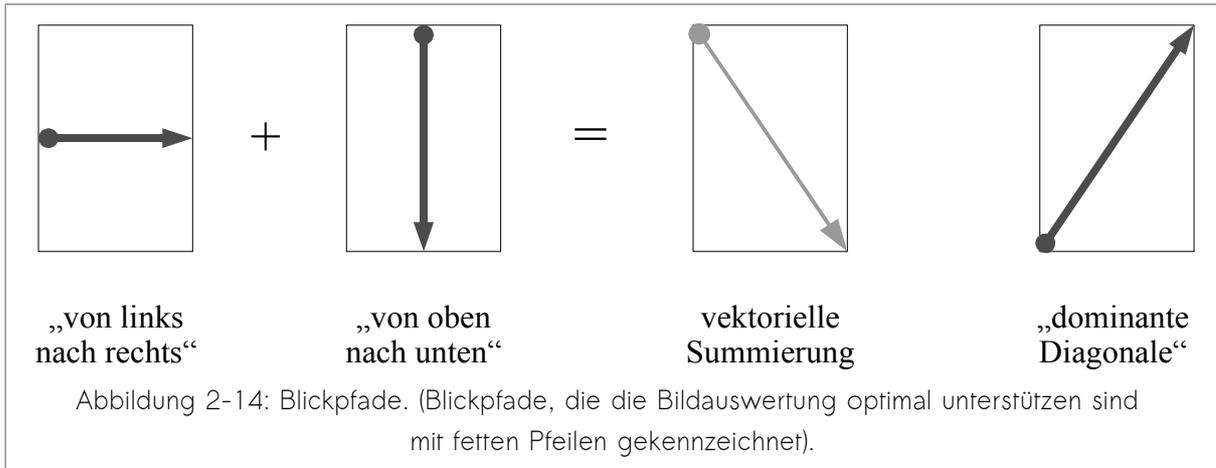
Die **indirekten Mittel** des Hervorhebens:

- Relative Größe: unauffällige, aber wichtige Bildelemente vergrößert abbilden. Die Vergrößerung kann bis 150% betragen, ohne dass der Betrachter irritiert wird (Ballstaedt, 1997, S.232). Die relative Größe des abgebildeten Objektes unterstützt das Behalten dieser visuellen Information;
- Die „Gesetze des Sehens“ so anwenden, damit eine Prägnanz erzielt wird (Abschnitt 2.2);
- Dreidimensionale Gestaltung: zwar reicht eine zweidimensionale Ansichtsdarstellung für viele Lernziele aus, allerdings hinterlassen dreidimensionale Abbilder einen größeren Eindruck beim Betrachter (Ballstaedt, 1997, S.226f);
- Bildmitte: Der Bildausschnitt bzw. der Blickwinkel soll so gewählt werden, dass die zentralen Inhalte in die Mitte platziert sind. Die Bildmitte wird nämlich intensiver ausgewertet als die Peripherie.

c) Blickpfad anlegen

Eine weitere Frage der Aufmerksamkeitssteuerung ist, wie man den Blickverlauf, d.h. die Reihenfolge der zu betrachtenden Objekte und dadurch die Bildauswertung lenken kann. Um einen solchen „Blickpfad“ anzulegen, können erneut direkte und indirekte Methoden herangezogen werden (Ballstaedt, 1997, S.234f). Im Allgemeinen gilt, dass diese unterschiedlichen Mittel der Steuerung nicht gegeneinander wirken dürfen, denn sonst führen sie beim Betrachter zu einem kognitiven Konflikt. Weiterhin soll der angelegte Blickpfad der Beschreibung des Sachverhalts im (Lern)text entsprechen.

Die Steuerung geschieht direkt mit numerischen Hinweisen und Pfeilen. Die indirekten Mittel machen sich angeborene und erworbene Sehgewohnheiten zu Nutze. Dementsprechend sollen Blickpfade *von links nach rechts* und *von oben nach unten* angeordnet werden. Durch eine vektorielle Summierung dieser Richtungen ergibt sich zwar eine Diagonale von links oben nach rechts unten (Abbildung 2-14). Ich selbst empfinde es aber in der Praxis unangenehm.



Die Betrachtungsrichtung von Diagonalen unterliegt, nach meiner Vermutung, anderen Gesetzmäßigkeiten. Da wir auf Diagonalen platzierte Bildelemente als räumliche Gestalten wahrnehmen, wird unsere Wahrnehmung anhand der Größenverhältnisse und der Zentralperspektive gelenkt (Abbildung 2-15). Die Gestalt im Vordergrund wird zum Ausgangspunkt der Betrachtung.

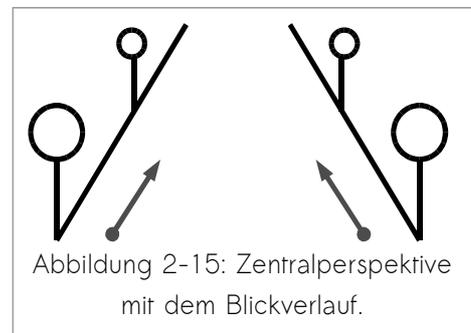
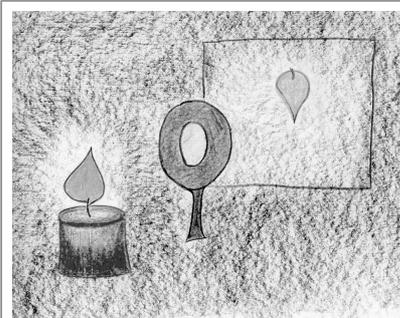


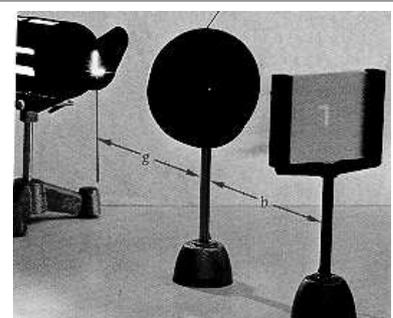
Abbildung 2-15: Zentralperspektive mit dem Blickverlauf.

Wenn man die zwei Bilder der Abbildung 2-16 betrachtet, ergibt sich anhand der Prägnanz des Vordergrund der folgende diagonale Blickverlauf:

- von links unten nach rechts oben, also Kerze → Linse → Mattscheibe (Abbildung 2-16a);
- von rechts unten nach links oben, also Mattscheibe → Lochblende → Gegenstand/Lampe, (Abbildung 2-16b).



a



b

Abbildung 2-16: Blickpfad anlegen:

- a) räumliche Anordnung entsprechend der „dominanten Diagonale“;
 b) falsche Platzierung der Elemente (Dorn-Bader, 1996, S.146).

Abbildung 2-16b ist gerade aus diesem Grund verwirrend. Unser Blick fällt aller erst auf die, im Vordergrund stehende, Mattscheibe. Die natürliche Bildauswertung verläuft dann von hier aus, von rechts unten nach links oben. Dies aber widerspricht der Ursache-Wirkungs-Kette der optischen Abbildung (Gegenstand/Lampe → Lochblende → Mattscheibe). Im Lernprogramm wird deshalb die „dominante Diagonale“ von links unten nach rechts oben bevorzugt (Abbildung 2-16a).

d) zum Vergleich anregen

Mit der visuellen Organisation kann man auch zu kognitiven Operationen anregen (vergleichen, Zusammenhänge finden, ...). Dazu muss man die zwei Abbilder mit ähnlichen Inhalten in gleich großem Format nebeneinander stellen. Dann wird der Beobachter die beiden Bilder nach unterscheidenden Merkmalen absuchen (wie in der Abbildung 2-16). Eine weitere Möglichkeit stellen die oben beschriebenen Farbcodes dar.

e) Aufmerksamkeit erhalten

Die Aufmerksamkeit kann erhalten bleiben, wenn die Schüler mit farbigen Abbildern stimuliert werden, wenn die Bilder eine abwechslungsreiche Reihenfolge bilden oder ihre Abfolge sogar von bildleeren Seiten unterbrochen wird.

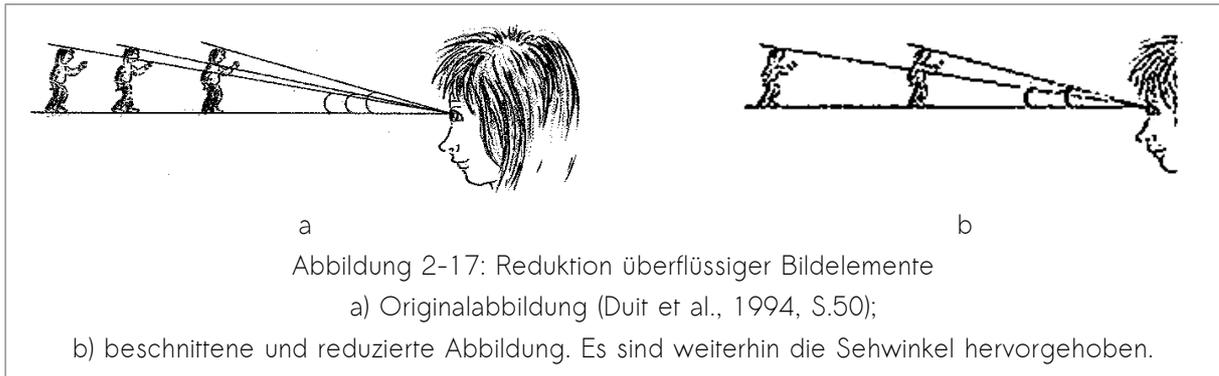
Eine wichtige Voraussetzung für kontinuierliche Bildauswertung ist aber auch, dass die Schüler dafür noch überhaupt freie kognitive Ressourcen haben (Abschnitt 1.2, „Limitierte Verarbeitungskapazität“). Die Bildgestaltung kann dem Anspruch einer geringen äußeren kognitiven Belastung (*extraneous cognitive load*) mit einer gestalterischen **Einfachheit** gerecht werden. An dieser Stelle werden ihre Richtlinien der Umsetzung beschrieben:

Beschränkung auf das Wesentliche

Das Bild soll nur für die Informationsvermittlung unverzichtbare Elemente enthalten, d.h.: So wenig Bildelemente wie möglich und so viel wie nötig. In einem Bild dürfen nicht mehr als 5-7 optische Gruppen sein (Ballstaedt, 1997, S.228). Überflüssige und verwirrende Elemente benötigen unnötig Kapazitäten des Arbeitsgedächtnisses und bedeuten damit ein Störpotential für den Lernprozess. Interessante aber unwesentliche Bildelemente dienen genauso wenig der Informationsvermittlung (Abschnitt 1.3, „Kohärenzprinzip“). Deswegen soll die Gestaltung auf diese visuelle Effekte verzichten, dabei darf der räumliche Kontext nicht verloren gehen. Wichtige Bildelemente sollen wiederum hervorgehoben werden.

Nehmen wir als Beispiel die Abbildung 2-17a: In Hinsicht auf den zu vermittelnden Inhalt (Sehwinkel) sind die Haare des Mädchens eine überflüssige optische Gruppe. Sie ziehen die Aufmerksamkeit unnötig auf sich. Wenn es um Reibungselektrizität ginge, wären die Haare wichtig, um die elektrische Aufladung des menschlichen Körpers zu zeigen. Weiterhin würde eine reduzierte Darstellung der Männchen ausreichen. Die Anzahl der Bildelemente sollte also nur dann erhöht werden, wenn es aus didaktischen Gründen geboten ist.

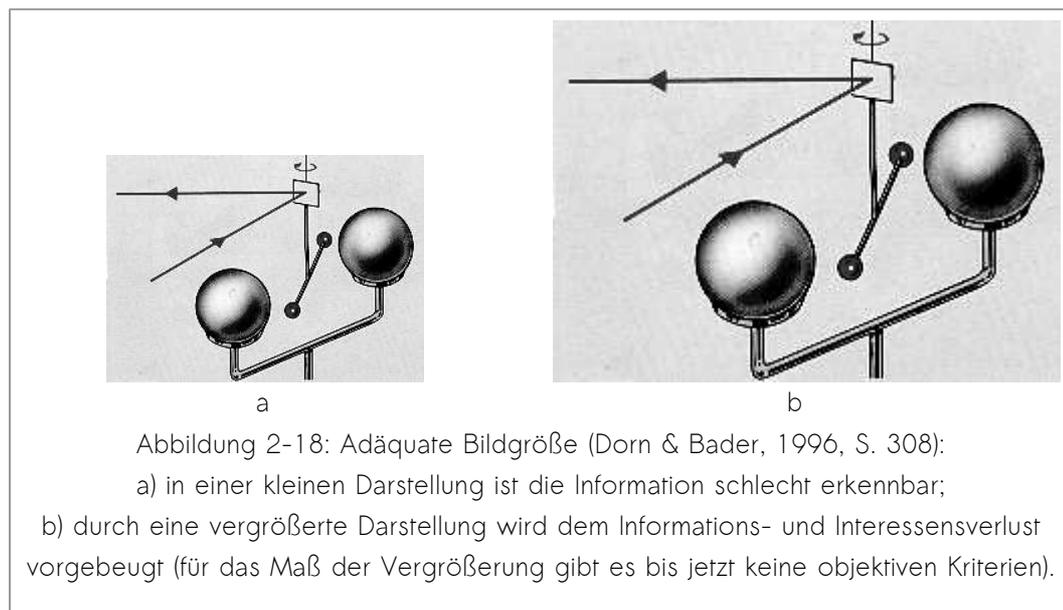
Abbildung 2-17a ist noch aus einem anderen Grund interessant. Hier treffen fachdidaktisches Wissen und Gestaltungsfragen aufeinander. Die Vergrößerung des Sehwinkels wird nicht prägnant genug dargestellt. Der Unterschied ist zwischen den Winkeln für das linke und mittlere Männchen vergleichsweise klein. Entweder werden die drei Männchen weiter auseinander stehend gezeichnet, oder es werden nur zwei Männchen dargestellt, die weiter auseinander stehen (Abbildung 2-17b).



Optimierung der Komplexität

Bei komplexen Lerninhalten kann das Bild mehr Elemente enthalten als lernpsychologisch erwünscht ist. Nach dem ersten Schritt der Reduktion („Beschränkung auf das Wesentliche“) stehen uns noch zwei Methoden zur Verfügung:

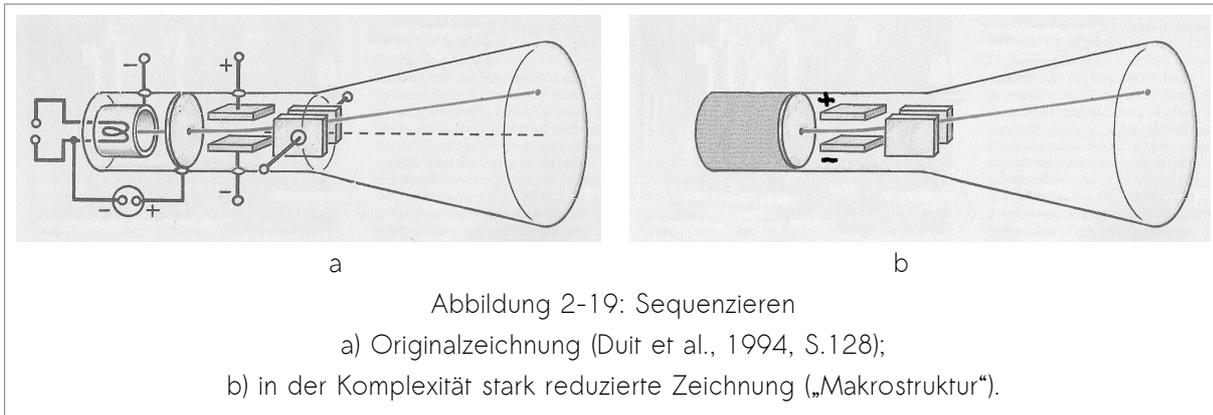
1) Die Bildgröße adäquat der Informationsdichte anpassen (Ballstaedt, 1997, S.229). Dabei gilt: Je mehr unverzichtbare Bildelemente die Darstellung enthält, desto größere Bildformate soll man wählen (Abbildung 2-18).



2) Sequenzieren, d.h. die komplexe Figur der Abbildung in mehrere aufeinander aufbauende Bilder aufteilen. Im ersten Bild sollen zusammengehörige Bildelemente zu einem Bildelement zusammengefasst werden. So entsteht eine Makrostruktur, die dann in mehreren Bildern stufenweise elaboriert werden kann (Weidenmann, 2002, S.92). Die Abbildung 2-19a enthält entbehrliche Elemente, wenn man lediglich die Funktion der Ablenkplatten der Braunschen Röhre verdeutlichen möchte. Es liegt daher nahe, die Bauteile zur Erzeugung des Elektronenstrahls zu einem Bildelement zusammenzufassen und die überflüssigen Elemente zu reduzieren. In der Abbildung 2-19b befinden sich jetzt nur noch fünf optische Gruppen. Zu

einem späteren Zeitpunkt der Unterrichtseinheit kann man die komplexere Abbildung zeigen, jedoch empfiehlt sich für Anfänger, stufenweise vorzugehen.

Andererseits, wer sich für die korrekte Beschaltung der Röhre interessiert, findet Abbildung 2-19a viel nützlicher. Es geht hier nicht darum, Bildelemente bloß wegzulassen, sondern vor dem Hintergrund einer definierten fachlichen und fachdidaktischen Vermittlungsabsicht ist zu entscheiden, was wegfallen bzw. zusammengefasst werden sollte.



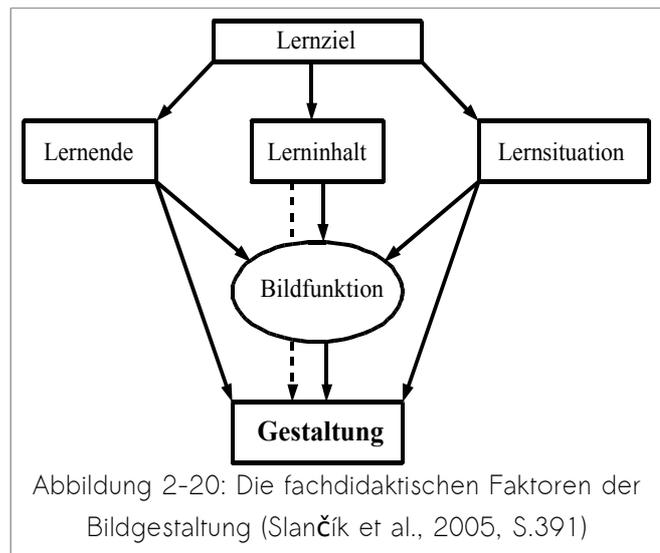
2.4 Fachdidaktisch angemessene Gestaltung

Bilder prägen das Weltbild von Schülern. Sie verfügen über eine Überzeugungskraft, die das „Nichtvorstellbare“ vorstellbar macht. Durch diese Veranschaulichung helfen sie der Abstraktion von Schülern. Das ist das altbekannte fachdidaktische Argument (siehe Comenius im Abschnitt 7.3), was den Einsatz von Bildern als Unterrichtsmaterial begründet. Was spricht heutzutage noch für den Bildeinsatz? Für die Begründung sollen einige fachdidaktische Ergebnisse herangezogen werden:

- Bilder generieren bei Schüler mehr Assoziationen als die ihnen vermeintlich entsprechenden Begriffe. Offenbar regen die Formen und Farben zu vielfältigeren Assoziationen an. Da die Assoziationen das **Vorwissen aktivieren**, ist dies ein Vorteil für das Verstehen fachlicher Inhalte (Sumfleth & Tiemann, 2000, S.125; N=51, Studierende des Lehramts für die Primarstufe, Thema: Redox- und Säure-Base-Reaktionen).
- Die Physik wird häufig erst durch eine didaktische Aufbereitung **verständlich**, wie z.B. eine angemessene Darstellung der Inhalte (Girwidz & Rubitzko, 2006, S.105).
- Bilder können durch ihre Ästhetik die **Aufmerksamkeit binden** (Abschnitt 2.3).
- Ohne Visualisierung werden Inhalte von Schüler als unwichtig eingestuft (Sumfleth et al., 2002, S.123; N = 46, 12. Klasse, nur Schülerinnen, Thema: Addition von Brom an Ethen). Da Bilder die Aufmerksamkeit des Lernenden vom Text ablenken können, werden die nicht bebilderten Inhalte eines illustrierten Textes geringer erinnert. Deswegen empfiehlt es sich, nur die **wichtigen Inhalte zu visualisieren** (Schnotz & Bannert, 1999, S.224).

- Im Fall eines engen Text-Bild-Bezugs wird die **Behaltens- und Transferleistung** bei Novizen **verbessert** (Schnotz & Bannert, 1999, S.218).
- Die Struktur der Bilder beeinflusst die **Struktur der mentalen Modelle** bzw. **Wissensstruktur**. Die Bildoberflächenstruktur wird zumindest teilweise auf die Struktur des mentalen Modells abgebildet (Schnotz & Bannert, 1999, S.225, 230; N=60, Studierende, Thema: Zeitunterschiede auf der Erde).

Die optimale Gestaltung und die damit einhergehende Effektivität von Bildern ist von mehreren fachdidaktischen Faktoren abhängig. Ihre heuristisch¹⁰ entwickelte Struktur zeigt die Abbildung 2-20. Die Bildgestaltung hängt indirekt von der Zielsetzung des Lernens ab. Das Lernziel ist in Bezug auf die Lernenden, den Lerninhalt und die Lernsituation formuliert. Diese letztgenannten Faktoren bestimmen direkt die Bildfunktion. Es soll weiterhin auch ihre direkte Wirkung auf die Bildgestaltung beachtet werden. Wie gestaltet man Bilder, die diesen Faktoren gerecht werden? Um das zu beantworten, sollen nun die Einflüsse der Faktoren kurz erläutert und die Ergebnisse der einschlägigen Forschung herangezogen werden:



Um das zu beantworten, sollen nun die Einflüsse der Faktoren kurz erläutert und die Ergebnisse der einschlägigen Forschung herangezogen werden:

1. Merkmale der Lernenden

Nach Weidenmann (1994, S.15) soll die Grafik optimal auf die Lernenden abgestimmt sein. Das bedeutet einerseits die Anpassung an deren Hintergrundwissen und andererseits an ihr Alter. Die erste Anforderung wird mit der **Bekanntheit der Bildelemente und der Symbole** erfüllt. Diese ermöglichen, dass Lernende auf kognitive Schemata der alltäglichen Wahrnehmung zurückgreifen können (Schnotz, 2002a, S.71) und erleichtern außerdem den Abruf von Vorwissen, sofern es vorhanden ist (vgl. Sumfleth et al., 2002, S.122). Die Verwendung von vertrauten Symbolen erleichtert die Informationsentnahme aus Bildern und beugt auch Fehlvorstellungen vor (Sumfleth et al., 2002, S.128). Bekannte Bildelemente bergen auch einige Gefahren: Bilder mit alltagsweltlichem Bezug lösen zwar mehr Assoziationen aus als Bilder mit fachwissenschaftlichem Bezug, aber die Lernenden nehmen oft eine andere Bedeutung des Bildes wahr, als es die Entwickler beabsichtigt haben. Das Ergebnis der Studie von Sumfleth & Tiemann (2000, S.126) spricht also für die Verwendung von Bildelementen mit Alltagsbezug unter der Voraussetzung eines engen Text-Bild-Bezugs.

Bezüglich des Alters der Lernenden schreibt Peeck (1994, S.75), dass „jüngere Kinder realistische und eher einfach gestaltete farbige Bilder vorziehen, während ältere Kinder und Er-

¹⁰ Vorgangsweise, um komplexe Probleme, die sich nicht vollständig lösen lassen, mit Hilfe einfacher Regeln und unter Zuhilfenahme nur weniger Informationen zu entwirren.

wachsene komplexere Bilder bevorzugen“. „Realistisch“ bedeutet in diesem Zusammenhang „Bekanntheit der dargestellten Objekte“, die bereits thematisiert wurden. Ein weiteres Argument für die Wahl einer einfachen Darstellung für jüngere Schüler lautet: „Jüngere Kinder haben bis zum Alter von etwa zwölf oder dreizehn Jahren Schwierigkeiten, irrelevante Informationen zu ignorieren und ein komplexes Bild vollständig aufzunehmen“ (Peeck, 1994, S.76). Behaltenseffekte durch Bilder werden auch deutlicher, „wenn eher räumliche Relationen oder zentrale Aspekte statt Details dargestellt sind“ (Peeck, 1994, S.69). Diese lernpsychologischen Argumente legen nahe, dass man die äußere kognitive Belastung durch die einfache Bildgestaltung verringern kann. Demzufolge lässt sich die Behauptung aufstellen, dass **einfache Darstellungen** von Kindern kognitiv leichter verarbeitet werden können. Ein weiterer Hinweis, dass sogar einfache schwarz-weiße Handzeichnungen auch von älteren Schülern für „gut“ und sogar als „hilfreich beim Verstehen“ angesehen werden, findet sich bei Starauschek (2001, S.89-94, 287).

Im Lernprozess spielen emotional-affektive Aspekte ebenso eine bestimmende Rolle wie kognitive Prozesse (Rabe, 2006b, S.254), insofern muss auch Bruhns Studie (2000, S.346; N=96, 8. und 9. Klasse, Gymnasium, Thema: geometrische Optik bzw. Elektrizitätslehre) in Betracht gezogen werden. Anhand dessen vermissen die Schüler in den physikalischen Bildern Menschen. Diese „**Identifikationsfigur**“ sollte am besten eine Person im Alter der Schülerinnen und Schüler und keine Erwachsene sein. So können die Schüler sich leichter mit der Person identifizieren. Die Figur übernimmt die Aufgabe, die Lernenden in das Geschehen der Lernumgebung einzubeziehen. Außerdem weckt sie ein angemessenes Interesse gegenüber der Darstellung.

Bruhns Studie zeigte weiterhin, dass die Schüler in den physikalischen Bildern comic-artige Darstellungen vermissen. Diese Illustrationen wirken *anregend*, weil sie humorvolle Ideen, Vorstellungen und Assoziationen induzieren. Andererseits wird ein allzu interessantes Bild zum konkurrierenden Reiz und lenkt die Aufmerksamkeit der Schüler von physikalischen Überlegungen ab. Wenn Schüler ein Bild als *herausfordernd* erleben, d.h. dass es ihnen schwierig und unverständlich vorkommt, dann steigt ihre Verarbeitungsintensität (Sumfleth & Telgenbüscher, 2000b, S.61). Hier muss man wiederum die kognitive Belastbarkeit der Schüler bedenken. Es empfiehlt sich also eine extreme Anregung und Herausforderung zu meiden.

2. Komplexität des Lerninhalts

Bilder unterstützen das Textverstehen, und Sprache hilft, das Bild zu interpretieren. Die **Komplexität des Bildes** muss an den Lerninhalt **angepasst** sein, um einen **engen Text-Bild-Bezug** aufrechtzuerhalten. Im Fall der Novizen soll dieser Bezug *redundant* sein, d.h. der Text soll erläutern, was im Bild dargestellt ist, und umgekehrt (Sumfleth & Telgenbüscher, 2001, S.451; Stachelscheid & Testrut, 1995, S.350). Die Intensität der Bildverarbeitung kann weiterhin durch *direkte Hinweise* erhöht werden, die die Aufmerksamkeit auf das entsprechende Teilbild lenken (Sumfleth et al., 2002, S.125). Dazu gehören Hinweise, worauf bei der Bildbetrachtung geachtet werden soll oder Aufforderungen wie etwa Zusammenhänge zwischen bestimmten Bildelementen zu nennen oder die Bedeutung räumlicher Beziehungen im Bild zu erklären (Sumfleth & Telgenbüscher, 2000a, S.100). Die *Beschriftung der Bilder* erleichtert

den Schülern die Generierung von adäquaten mentalen Modellen (Sumfleth & Telgenbüscher, 2001, S.452). Spärlich beschriftete Darstellungen werden von Lernenden oft missverstanden (Sumfleth & Telgenbüscher, 2000a, S.109). Zu einem engen Text-Bild-Bezug gehört auch die *räumliche Nähe von Text und Bild*. Die sprachliche Beschreibung muss sich deshalb in unmittelbarer Nähe der visualisierten Inhalte befinden. Dies erleichtert das Generieren der Verknüpfungen zwischen verbalem und visuellem System, ohne den Arbeitsspeicher zu überlasten (Mayer & Anderson, 1991). Wenn diese räumliche Nähe nicht gegeben ist, führt die Anordnung von Bild und Text zu einer separaten Nutzung. Dadurch ist die Lernumgebung für sinnvolles Lernen ungeeignet (Sumfleth & Telgenbüscher, 2000a, S.109).

Bei komplexen Darstellungen gerät man aber trotz des engen Text-Bild-Bezuges in Konflikt mit der Forderung der möglichst geringen äußeren kognitiven Belastung. Im Abschnitt 2.3 wurden unter dem Punkt „Aufmerksamkeit erhalten“ praktische Empfehlungen für eine angemessene Bildgestaltung in einem solchen Fall gegeben. Für eine **Reduktion der Informationsdichte** sprechen außerdem folgende Ergebnisse einer fachdidaktischen Studie: Ein mehrstufiger komplexer Vorgang kann in Einzelschritte zerlegt werden („step“), in denen jeweils das Wesentliche betont wird („parts“). In jedem Schritt werden die kausalen Zusammenhänge hervorgehoben, damit die Schüler die Dynamik der Prozesse prägnant wahrnehmen können. So wird das Aufnahmevermögen von Schülern nicht überfordert (Sumfleth & Telgenbüscher, 2000b, S.62). Diese Bildfolge gestaltet man mit der Methode des Sequenzierens (Abschnitt 2.3). In diesen „step & parts“-Bildern werden die Bildelemente zusätzlich beschriftet und die Zustände kurz erläutert. Novizen, denen der Lernstoff in dieser Form vorgegeben wird, schneiden im Transferleistungstest¹¹ besser ab, als die Novizen mit einem komplexen Schulbuchbild. Dieses Ergebnis kann man so interpretieren, dass „step & parts“-Bilder die Generierung eines adäquaten mentalen Modells erleichtern (Sumfleth & Telgenbüscher, 2000b, S.74). Eine vereinfachte Variante dessen ist, wenn zwei Bilder und ein kurzer Text die Zustände vor und nach dem Versuch zeigen bzw. beschreiben (Sumfleth & Telgenbüscher, 2001, S.455).

Durch die **parallele Darstellung von realitätsnahen und abstrakten Bildern** lassen sich Brücken zwischen Realität und Erklärungsmodellen aufbauen. Die Visualisierung nur der abstrakten Ebene führt zum Lernen von Algorithmen ohne Verständnis der entsprechenden Konzepte (Gabel, 1995 zitiert nach Sumfleth & Telgenbüscher, 2001, S.439). Fotografien von Naturphänomenen können Schülern helfen, physikalische Zusammenhänge auch in der Natur zu erkennen (Girwidz & Rubitzko, 2006, S.113).

3. Lernsituation

Hier muss bedacht werden, unter welchen Bedingungen das Lernen stattfindet: mit welchem Medium, wo, mit welcher Unterrichtsmethode und in welcher Zeit gelernt wird.

Wenn die Lernzeit knapp bemessen ist, sind für den Wissenserwerb **einfache Zeichnungen** hilfreicher. Wenn sehr viel Betrachtungszeit zur Verfügung steht, können Lernende stärker von realistischen Bildern profitieren (Peeck 1994, S.79). Da in der vorliegenden Arbeit ein

¹¹ Zur Lösung dieser Aufgaben werden Informationen benötigt, die nicht explizit im Lernmaterial enthalten sind.

Treatment für eine Schulstunde geplant ist, steht den Schülern somit eine begrenzte Zeit zur Verfügung. Auch deshalb erscheinen einfache Darstellungen als geeignet für das Lernmaterial.

Wenn Lernende stärker zu Eigenaktivität angeregt werden sollen, ist es ebenfalls günstiger, einfache Skizzen zu zeigen. In einer Studie mit Architekturstudenten wurden **Handzeichnungen** als Anregung für weitere Diskussion betrachtet. Die Probanden drückten zahlreichere eigene Ideen aus, als im Fall einer perfekten Computergrafik (Weidenmann, 2002, S.90). Man kann Bilder auch von Schülern zeichnen lassen. Einerseits ist die Bereitschaft der Schüler zum Bildentwurf höher als zum Schreiben (Wimber, 1997, S.30). Andererseits kann die Intensität der Bildverarbeitung erhöht werden. Die Methode unterstützt somit Verstehensprozesse, wodurch im Fall der Studie von Seufert et. al. (2007, S.33) Studierende in Behaltens- und Transferleistung besser abschneiden.

Eine Gefahr des Bildeinsatzes kann in der Vereinfachung der Realität liegen. Die Schüler könnten denken, dass die Wirklichkeit so sei: Es erscheint anhand der Anschaulichkeit des Bildes einleuchtend. Es könnten jedoch bei den Lernenden Fehlvorstellungen entstehen (Rühenbeck, 1997, S.38). Deswegen ist es wichtig, den Schülern bewusst zu machen, wo die Analogie des Bildes zur Wirklichkeit aufhört (Sandomir et al., 1993; Sumfleth & Telgenbüscher, 2000a, S.99). Dieses **Unterrichtsgespräch** kann sich aus der Methode der Bildbeschreibung entfalten, wobei allgemeine Fragen oft besonders effektiv sind, da sie umfassende Antworten induzieren. Einige Beispiele: Was zeigt das Bild? Was vermisst Du auf dem Bild? Was sagt der Text, was im Bild nicht gezeigt wird? Was zeigt das Bild, was im Text nicht enthalten ist? Diese Fragen bilden auch in der vorliegenden Arbeit den Kern von Interviews zur Bildgestaltung (Abschnitt 7.5, Anhang C.2, Leitfaden 1.1). Damit ergeben sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten der Bilder im Unterrichtsgespräch:

- Man kann mit unvollständigen oder unzutreffenden Bildern provozieren und daraus folgend eine vertiefende Diskussion mit der Klasse führen. Das fördert einerseits das Inhaltsverständnis, andererseits die Fähigkeit zur Kritik bei Schülern (Rühenbeck, 1997, S.45).
- Die Intensität der Bildverarbeitung wird weiter erhöht, wenn die Schüler selbst eine Auswahl von Bildern treffen dürfen und diese begründen (Sumfleth & Telgenbüscher, 2001, S.453f).

Man kann also herausfinden, was die Schüler im Bild sehen und dadurch Schülervorstellungen aufdecken (Guesne, 1984, S.87). In der Beschreibung der Bilder unterscheiden sich Experten und Novizen: Experten bemerken die in den Bildern ablaufenden Prozesse und kausalen Zusammenhänge, während bei Novizen Gerätebeschreibungen dominieren (Sumfleth & Telgenbüscher, 2000b, S.76).

4. Funktion der Bilder

In der Literatur finden sich zahlreiche Aufzählungen von Bildfunktionen (Levie & Lentz, 1982; Levin et al., 1987; Weidenmann, 1988). Da mit der Zeige- und Konstruktionsfunktion (Weidenmann, 2002, S.85-88) die häufigsten Bildthemen in der Physik abgedeckt werden

können, soll der Schwerpunkt hier auf diesen liegen:

Anhand der Bilder mit **Zeigefunktion** sollen die Lernenden eine entsprechende visuelle Vorstellung zum Bildthema entwickeln. Durch visuelles Hervorheben (Abschnitt 2.3) werden die Lernenden in die Lage versetzt, Wichtiges von Unwichtigem zu unterscheiden. Physikalische Inhalte, die mittels Zeigefunktion dargestellt werden können, sind Geräte, Naturphänomene, Bewegungen von makroskopischen oder mikroskopischen Objekten, sowie Versuchsdurchführungen.

Bilder mit **Konstruktionsfunktion** sollen den Schülern bei der Konstruktion von adäquaten mentalen Modellen helfen, indem sie sowohl die Elemente des Sachverhalts als auch deren Zusammenspiel visuell darstellen. Dadurch eignen sie sich für die Darstellung von komplexeren Realitätsausschnitten, z.B. Prozessen und Ereignissen, wie das Funktionieren eines Motors, die Zustandsänderungen von Stoffen in Abhängigkeit von p , V , T , usw.

Zusammenfassung

Abbildung 2-21 zeigt als grafische Zusammenfassung die Struktur der behandelten Faktoren, die direkt auf die Bildgestaltung einwirken. Da die Verknüpfungen zwischen den Begriffen sehr vielfältig sind und dies die Übersichtlichkeit des Schemas beeinträchtigen könnte, wurden nicht alle Verbindungen eingezeichnet. Zwei Merkmale der lernförderlichen Bildgestaltung – „Einfachheit“ und „Bekannte Bildelemente“ – kommen mehrmals vor, da sie von mehreren Faktoren ableitbar sind. Auf die Anfangsfragestellung „Was ist ein lernförderliches Bild für das Physiklernen?“ wurden die folgenden Gestaltungsprinzipien für diese Untersuchung als Antwort gefunden:

- Die **physikalische „Richtigkeit“** und die **didaktische Angemessenheit** des Gezeichneten wird erwogen und ihre Balance als Grundprinzip bei der Bildgestaltung vorausgesetzt.
- Die Gestaltung wird im nächsten Schritt unter dem Aspekt der **äußeren kognitiven Belastung optimiert**, die möglichst verringert werden soll. Aus diesem Grund werden die folgenden gestalterischen Mittel eingesetzt: Einfachheit der Darstellungen, konsistente Gestaltung für das ganze Lernprogramm, bekannte Bildelemente, Einführung von Farbcodes. Die durch den Lerninhalt gegebene Komplexität wird in Bezug auf die Schüler optimiert, gegebenenfalls wird die Informationsdichte reduziert.
- Die „Einfachheit“ der Illustrationen und die parallele Darstellung von realitätsnahen sowie abstrakten Bildern sollen den **Aufbau von mentalen Modellen** unterstützen.
- Die Zeige- und Konstruktionsfunktion in den Bildern wird anhand **fachdidaktischer Überlegungen** realisiert. Es werden kolorierte Handzeichnungen gewählt, weil sie eine anregende, motivierende Funktion bei den Schülern erfüllen. Mit einer Identifikationsfigur werden die Lernenden in die Handlungen einbezogen.
- Um die **Prägnanz** der Darstellung zu gewährleisten, werden bei der Gestaltung die „Gesetze des Sehens“, soweit die physikalische „Richtigkeit“ und die didaktische Angemessenheit

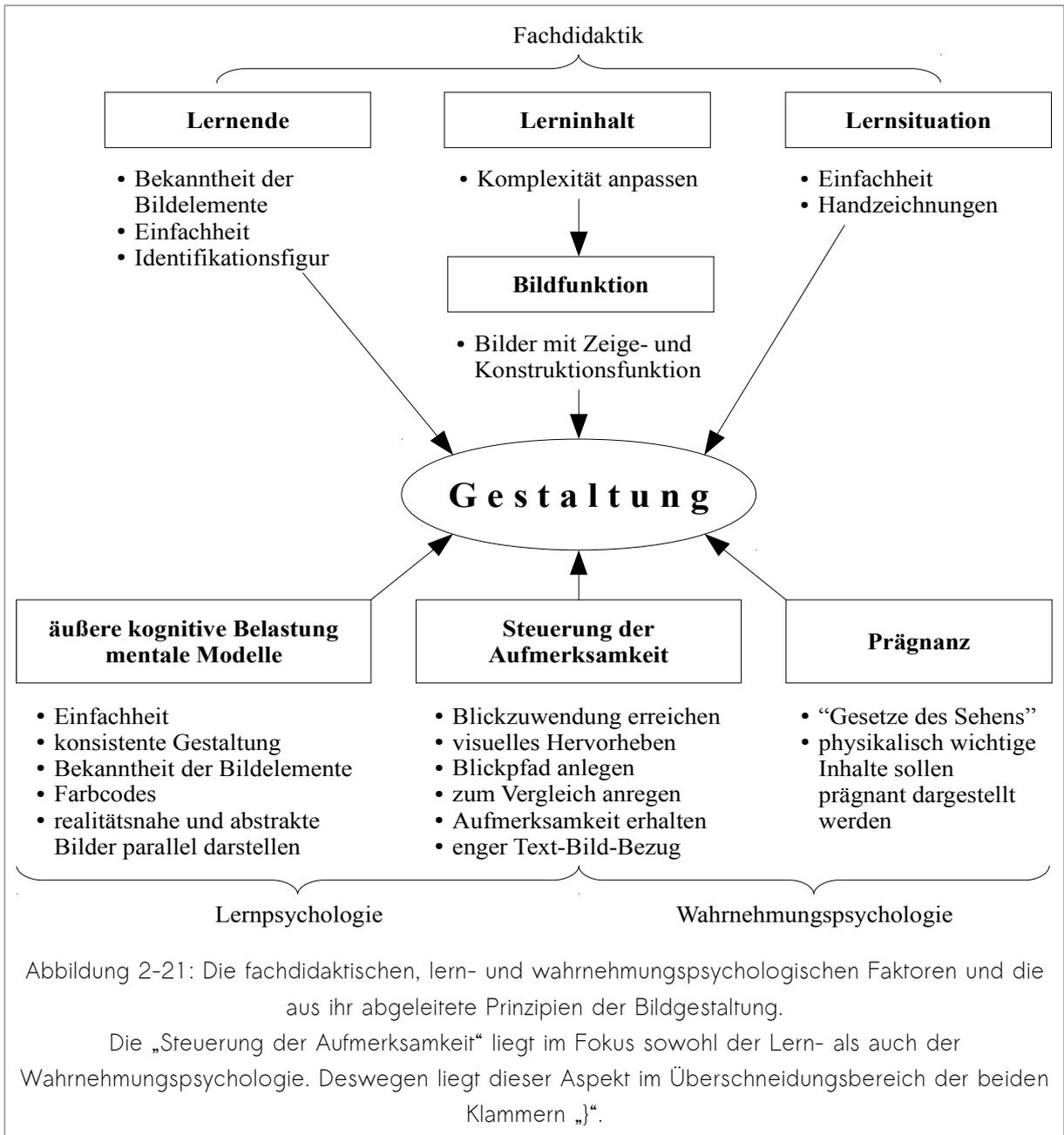
dies erlauben, beachtet. Dabei sollen die visuell prägnanten Stellen den für das Lernen wesentlichen physikalischen Sachverhalten entsprechen.

- Die Werkzeuge der Bildgestaltung werden für die **Steuerung der Aufmerksamkeit** angewendet. So wird mit Bildern eine Blickzuwendung erreicht, der wichtige Inhalt visuell hervorgehoben, sowie in Bildern ein Blickpfad angelegt, zum Vergleich von zwei Bildern angeregt und schließlich die Aufmerksamkeit erhalten. Zur Steuerung der Aufmerksamkeit wird auch ein enger Text-Bild-Bezug beitragen.

Das Besondere der vorliegenden Arbeit besteht in der ausdrücklichen Betonung der Bilder und ihrer Einfachheit im Wissenserwerb, worüber in der Fachdidaktik bisher wenig geforscht wurde. Es wird eine theoretisch abgeleitete und experimentell fundierte Struktur der Gestaltungsprinzipien erarbeitet, um den Wissenserwerb von Schülern gezielt zu unterstützen. Die Gestaltungsprinzipien haben zwar eine nachgewiesene steuernde Wirkung, aber das visuelle Angebot wird auch je nach Interessen und Vorwissen des Betrachters unterschiedlich genutzt. Der Mensch ist ein viel zu komplexes Wesen für eine ausschließlich „automatisierte“ Wahrnehmung. Dementsprechend kann die Umsetzung dieser Prinzipien in der Bildgestaltung eine vollständige Informationsentnahme nicht sicherstellen, jedoch erhöht sich deren Wahrscheinlichkeit signifikant. Auf dieser Grundlage können lernförderliche Bilder für das Lernprogramm entwickelt werden.

In das zweite Kapitel sind auch Erfahrungen eingeflossen, die bei der Analyse von Bildern in Schulbüchern zum Thema „Lochkamera“ und „Optische Abbildung“ gewonnen wurden. Diese Vorarbeit wird hier nicht beschrieben. Einige praktische Regeln für Lehrer zur Bewertung von Bildern und zur Verbesserung der Gestaltung von selbst gezeichneten Bildern wurden in Berger & Staraschek (2009, S.23-26) veröffentlicht.

Die konkrete Umsetzung der Gestaltungsprinzipien für das Lernprogramm wird im Abschnitt 7.4.1 dargestellt. Diese Bilder werden dann, nach validierenden Interviews (Abschnitt 7.5), zu Animationen weiterentwickelt.



3 Animationen

„Die Welt ist meine Vorstellung.“
(Schopenhauer)

„Ein Kino im Kopf?“
(Deutschlandfunk, 17.8.2003)

3.1 Kognitive Verarbeitung von Animationen

Zunächst soll in diesem Abschnitt geklärt werden, was in der vorliegenden Arbeit unter Animationen verstanden wird und wie sie charakterisiert werden können. Die folgende Definition kann dazu herangezogen werden:

„Als animiert werden [...] Bilder bezeichnet, deren grafische Struktur sich während der Darbietung verändert.“ (Schnotz et al., 1998, S.136)

Schnotz bezieht sich in seiner Definition auf die äußere Darstellung der Information. In seinen Ausführungen stellt er ferner heraus, dass Animationen an ein spezifisches Repräsentationsmedium gebunden sind (Film, Video, Computer). „Animationen“ bzw. „dynamische Bilder“ sind sehr allgemeine Begriffe. Für Forschungszwecke braucht man eine differenziertere Charakteristik dynamischer visueller Repräsentationen. Lowe unterscheidet grundsätzlich zwischen *einfachen* und *komplexen* Animationen. Bei den einfachen Animationen werden nur wenige Objekte verschoben; bei den komplexen Animationen zeigt eine große Zahl von Objekten dynamische Verhaltensweisen unterschiedlicher Arten (Lowe, 1998, S.126). Weiterhin können sich die Objekte der Animation in einem bestimmten zeitlichen Ablauf sowohl auf *extrinsische* als auch auf *intrinsische* Weise ändern. Zu extrinsischen Änderungen gehören **Translationen**, in denen die Objekte sich als Ganzes von einer Position zu einer anderen bewegen (Änderungen in der räumlichen Lage) und **Transitionen**, bei denen die Objekte erscheinen oder verschwinden. Die intrinsischen Änderungen sind **Transformationen**, bei denen sich die Gestaltungsmerkmale von Objekten, z.B. Größe, Farbe, interne Struktur, Form, Orientierung, usw. ändern (Lowe, 1998, S.126; 2003, S.159).

In den schon erwähnten kognitionspsychologischen Theorien der Bildverarbeitung (Theorie des Multimedialernens nach Mayer, 1997, 2001; Integriertes Modell des Text- und Bildverstehens nach Schnotz & Bannert, 1999) wird nicht zwischen statischen und animierten Bildern unterschieden. Es wird *nur intuitiv* angenommen, dass sich Animationen zur Darstellung von Prozessen besser eignen als statische Bilder (Mayer, 1997; Lewalter, 1997b; Schnotz et al., 1998; Lowe, 2001). Solche potenziellen Vorteile können aus der **Supplantationstheorie** von Salomon (1979, 1994) abgeleitet werden: Ihr zufolge kann ein äußeres Medium einen fehlenden inneren Prozess (hier die Fähigkeit zur Imagination dynamischer Abläufe) ersetzen. Auf-

grund dieser unmittelbaren Veranschaulichung der Dynamik, wird eine Reduktion kognitiver Anforderungen an die Lernenden erwartet. Animationen stellen dann eine visuelle Unterstützung der mentalen Prozesse dar. Diesbezüglich schreibt Schnotz, dass bei der Verarbeitung von Animationen nicht nur räumliche Strukturen, sondern auch deren zeitlicher Verlauf auf die Dynamik eines entsprechenden mentalen Modells abgebildet werden (Schnotz et al., 1998, S.137; Lowe, 2003, S.157). Animationen unterstützen nach dieser Theorie also durch ihre Prozessinformation den Aufbau **dynamischer mentaler Modelle**, an denen die Lösung neuer Problemstellungen mental simuliert werden kann (Abschnitt 3.2). Eine Schwäche des Modells nach Schnotz besteht darin, dass zwar über dynamische mentale Modelle gesprochen wird, diese selbst aber im Modell explizit nicht auftauchen. Um diese Lücke zu schließen, greift die vorliegende Arbeit auf **neuropsychologische Erkenntnisse** zurück und reichert damit Mayers, im Abschnitt 1.2 vorgestellte Theorie des Multimedialernens an. Das entstandene „Erweiterte Modell der Informationsverarbeitung“ soll eine Möglichkeit aufzeigen, die Verarbeitung der Animationen noch differenzierter zu modellieren. Dies bildet dann die Grundlage für die empirische Untersuchung der vorliegenden Arbeit und kann bei der zukünftigen Forschung zum Lerneffekt durch Animationen erwogen werden. Bevor das erweiterte Modell beschrieben wird, sollen seine zu Grunde liegende neuropsychologische Ergebnisse erläutert werden.

Das Sehen von Bewegung ist eine grundlegende Leistung unseres visuellen Systems und das Sehen von Animationen bildet nur einen multimediaspezifischen Teilaspekt desselben. Es handelt sich in beiden Fällen um eine Funktion, die aus der retinalen Verschiebung zweidimensionaler Lichtmuster die Bewegung von Objekten in einem dreidimensionalen Raum ableitet. Deshalb können wir uns zur Verarbeitung der Animationen auch aus der Perspektive der Neuropsychologie nähern. Auf die Frage der Übersetzung von zweidimensionalen Netzhautbildern in eine dreidimensionale Vorstellung wurde im Abschnitt 2.2 eingegangen. Im Zusammenhang mit dem Sehen von Bewegung stand lange zur Debatte, ob es aus primitiveren sensorischen Prozessen (explizite Raum- und Zeitmessungen) ableitbar ist oder als eigenständige visuelle Dimension zu verstehen ist. Von einer retinalen Bildverschiebung, die z.B. von einem sich bewegenden Mensch hervorgerufen wird, könnte man auf eine explizite Raum- und Zeitmessung des visuellen Systems schließen, jedoch gibt es andere Phänomene (Bewegungsnacheffekt¹², apparente Bewegung¹³) die dagegen sprechen. In diesen Fällen wird Bewegungswahrnehmung hervorgerufen, obwohl keine retinale Bildverschiebung stattfindet. Die Entdeckung von *richtungsselektiven Neuronen* im kortikalen System entschied die Debatte. Deren Aktivität ist maximal, wenn in ihrem rezeptiven Feld Bewegung in eine bestimmte Richtung präsentiert wird. Diese Neuronen sind auch sensitiv für die Geschwindigkeit des Bewegungsreizes, weiterhin berücksichtigen sie die Eigenbewegungen des Beobachters (Haarmeier, 2006, S.41ff). Die Analyse der Bewegung verläuft also in einem separierten visuellen Sy-

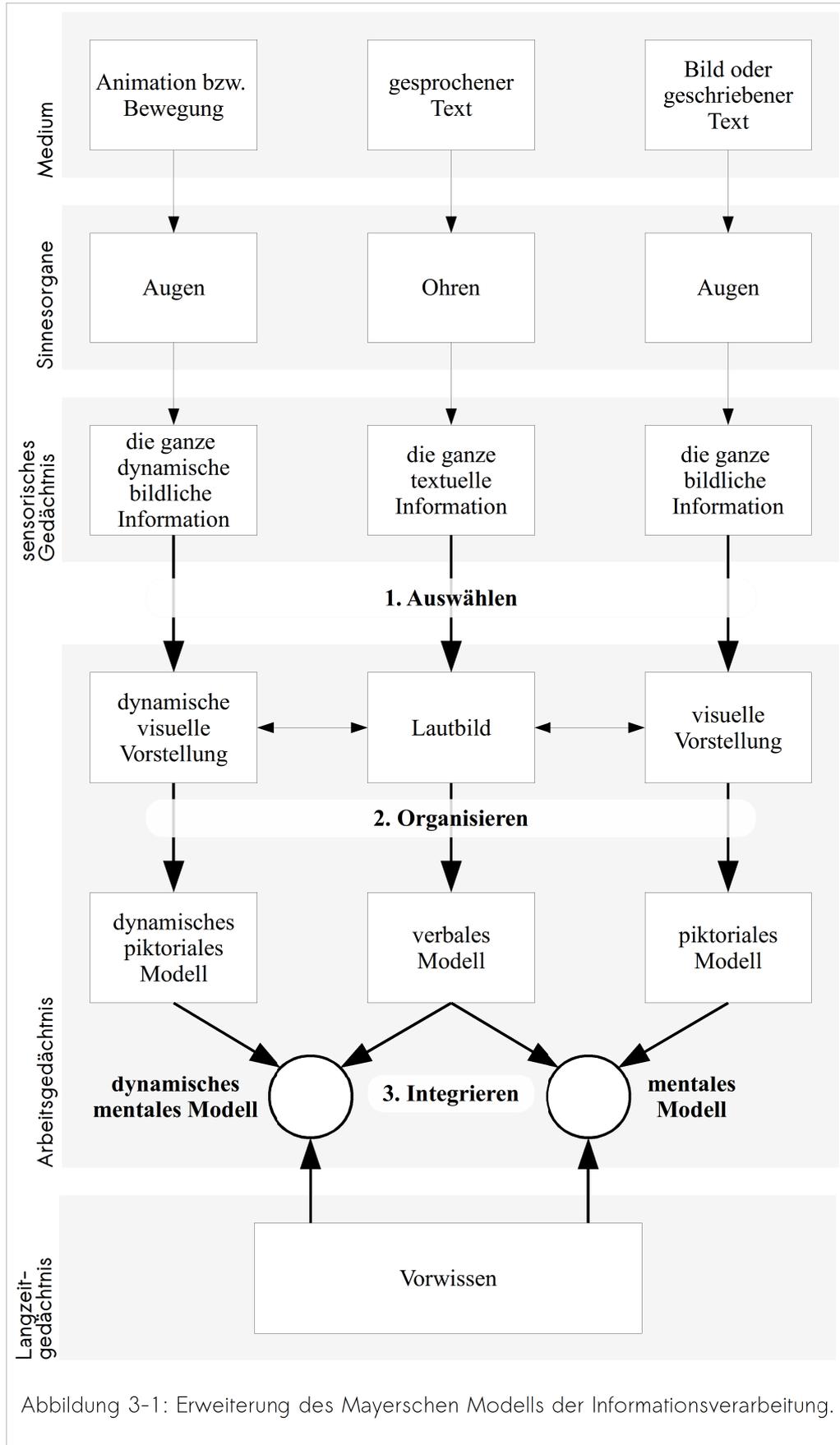
12 Bewegungsnacheffekt tritt auf, wenn man längere Zeit eine kontinuierliche Bewegung betrachtet und den Blick anschließend woanders hinrichtet. Der statische Inhalt des Blickfeldes scheint dann teilweise, sich in die entgegengesetzte Richtung zu bewegen.

13 Die apparente Bewegung ist auch eine optische Täuschung. Es tritt z.B. bei den Leuchtreklamen auf, wenn wir die sequentiell aufleuchtenden statischen Lämpchen als ein bewegtes Objekt wahrnehmen.

stem („M-Pfad“) und ein komplementäres System registriert die Information über Farbe und Form („P-Pfad“). **Auf der neuronalen Ebene unterscheidet sich also das Bewegungssehen von der Objekterkennung.** Aufgrund dieser Verschiedenheit kann man auf der funktionalen Ebene zwei unterschiedliche Gedächtnisbereiche annehmen. Sie verarbeiten die beiden verschiedenen Arten von Information auf unterschiedliche Weise und gehören beide zum visuell-räumlichen System des Arbeitsgedächtnisses (Abschnitt 1.2). In dieser Arbeit können daher bezüglich des Arbeitsgedächtnisses die Bereiche des Bewegungssehens bzw. der Objekterkennung differenziert werden. Diese Vorgehensweise entspricht dem (üblichen) Vorgehen der Gedächtnisforschung (Buchner, 2006, S.438). Anhand dieser neuropsychologischen Erkenntnisse wird neben den zwei Verarbeitungssystemen der Lernpsychologie (visuell/piktorial bzw. auditiv/verbal) **ein drittes Subsystem der Informationsverarbeitung** angenommen. Dieses eigenständige System ist auf das Bewegungssehen spezialisiert und damit auch auf die Verarbeitung von Animationen. Zu dem theoretischen Rahmen von Mayer (Abbildung 1-2) kann also ein drittes Verarbeitungssystem hinzugefügt werden (Abbildung 3-1). Als Folge dieser Erweiterung verläuft die Verarbeitung von Animationen auf folgender Weise:

Die Animation gelangt durch die Augen in das sensorische Gedächtnis. Im Prozess des Auswählens („*selecting*“), was anhand von gespeichertem Wissen und Erfahrung verläuft, wird die wahrscheinlichste Interpretation des Gesehenen ins Arbeitsgedächtnis überführt (Abschnitt 2.2). Sie wird im Bereich des Arbeitsgedächtnisses für Bewegungssehen als „dynamische visuelle Vorstellung“ erfasst. Da die Subsysteme des Gedächtnisses niemals allein, sondern immer im komplexen Zusammenspiel sich häufig überlappender neuronalen Netzwerke funktionieren (Ullsperger & Cramon, 2006, S.488), wird im Rahmen dieses Modells angenommen, dass der bildhafte dynamische Sinneseindruck in ein Lautbild des verbalen Systems umgewandelt wird. So sieht man zum Beispiel einen laufenden Menschen und gleichzeitig denkt man an den Begriff „*Laufen*“. Im Prozess des Organisierens („*Organizing*“) werden die im Arbeitsgedächtnis gehaltene dynamischen visuellen Vorstellungen miteinander verknüpft. Dies ist die eigentliche Sinnentnahme, das Verstehen des Gesehenen. Das Produkt dieser semantischen Weiterverarbeitung sind die so genannten verbalen und dynamischen piktorialen mentalen Modelle. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass die Dinge durch diesen Prozess des Umorganisierens selbst verstanden werden und nicht dadurch, dass man ihnen einen Namen gibt oder sie einem Begriff zuordnet. In der dritten Phase verbindet der Lernende das verbale und dynamische piktoriale mentale Modell, also das konstruierte Wissen mit dem Vorwissen. Durch diesen Prozess der Integration („*Integrating*“) entsteht ein integriertes mentales Modell von dynamischem Charakter, kurz „*dynamisches mentales Modell*“.

In diesem durch neuropsychologische Erkenntnisse inspirierten erweiterten Modell verläuft die Verarbeitung von dynamischen bildlichen Information analog zur statischen Bildverarbeitung, nur ist das Endprodukt dieses Prozesses ein „*lauffähiges*“ mentales Modell.



Die neuronalen Mechanismen des Sehens lassen auch einige Vermutungen zur Wirksamkeit von Animationen im Wissenserwerb zu. Die Vorteile dynamischer Bilder gegenüber statischen Bildern zeigen sich im Hinblick auf die Reduktion kognitiver Anforderungen (1), Steuerung der Aufmerksamkeit (2) und Figur-Grund-Trennung (3):

1. Wenn das Ziel des Lernens ein dynamisches mentales Modell eines Sachverhalts ist, dann müsste auf der Basis von statischen Bildern in höheren mentalen Prozessen noch eine Dynamik generiert werden, was zusätzliche Ressourcen beansprucht. Deshalb könnten Animationen das Lernen in solchen Fällen stärker unterstützen (Telefongespräch mit Dirk Jancke, Neurobiologe der Ruhr-Universität Bochum, Mai/ 2007). Dieses Argument findet man auch bei Schnotz (*enabling function*, 2002b, S.1).
2. Bewegung in einer ansonsten unbewegten Umwelt zieht unsere Aufmerksamkeit auf sich und erlaubt uns, die Ursache der Bewegung (und somit z.B. eine potentielle Gefahrenquelle) durch zielgerichtete Blickwendungen einer genauen Analyse zu unterziehen (Haarmeier, 2006, S.49). Diese Blickzuwendung ist aber nicht nur als automatische Orientierungsreaktion zu werten, sondern markiert die Umverteilung von Aufmerksamkeitsressourcen zugunsten potentiell handlungsrelevanter Reize (Ullsperger & Cramon, 2006, S.481).
3. Bewegung hilft bei der „Figur-Hintergrund-Trennung“, weil sich Punkte, die zu einem gemeinsamen Objekt gehören, in der Regel gemeinsam bewegen. Unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile markieren somit mit hoher Wahrscheinlichkeit Objektgrenzen (Haarmeier, 2006, S.50).

Bewegte Objekte rufen also einen Aufmerksamkeitswechsel hervor und besitzen dadurch eine **höhere Prägnanz** in der Darstellung. All diese ermutigenden Tatsachen sagen jedoch noch nichts über einen positiven Lerneffekt durch dynamische Darstellungen aus. Welche visuelle Repräsentation beim Lernen tatsächlich förderlicher ist, wird im folgenden Abschnitt 3.2 thematisiert. Es wird auf die potenziellen positiven und negativen Wirkungen von Animationen im Lernprozess eingegangen. Weiterhin werden ausgewählte empirische Ergebnisse der bisherigen Forschung präsentiert.

3.2 Lernwirksamkeit von Animationen

Die Besonderheit von Animationen liegt der Definition entsprechend (Abschnitt 1.3) in der expliziten und modellhaften Darstellung des zeitlichen Ablaufs von Prozessen. In der Literatur (Schnotz et al., 2001; Schnotz, 2002b) werden auch weitere Funktionen von Animationen benannt. Diese Funktionen und ihre positiven Auswirkungen auf den Lernprozess werden im Folgenden aus dem speziellen Charakter der Animationen abgeleitet. Einen grafischen Überblick bietet Abbildung 3-2. Durch die explizit **modellhafte Darstellung** lassen sich Animationen von Filmen abgrenzen, die real aufgenommene Prozesse zeigen. Durch diese modellhafte Darstellung der Vorgänge wird in Animationen ein höheres Abstraktionsniveau erreicht. Dieses ermöglicht die Entwicklung mentaler Modelle (Lowe, 2003, S.160). Aus der un-

mittelbaren Veranschaulichung des **zeitlichen Ablaufs** resultieren mehrere Vorteile, die von verschiedenen empirischen Hinweisen gestützt sind:

- Animationen leisten eine visuelle Unterstützung beim Aufbau **dynamischer mentaler Modelle**, sodass dynamische Konzepte, Veränderungen eines Sachverhalts schneller begriffen werden (Schnotz et al., 1998, S.141; Bétrancourt & Tversky, 2000, S.311f; Lowe, 1998, S.126). Der Lernende kann dann durch diese externe Unterstützung mentale Prozesse leichter ausführen (*facilitating function*). Aufgrund des erleichterten Aufbaus dynamischer mentaler Modelle kann man annehmen, dass der Lernende zu einer besseren Transferleistung bezüglich des dynamischen Sachverhaltes befähigt wird.

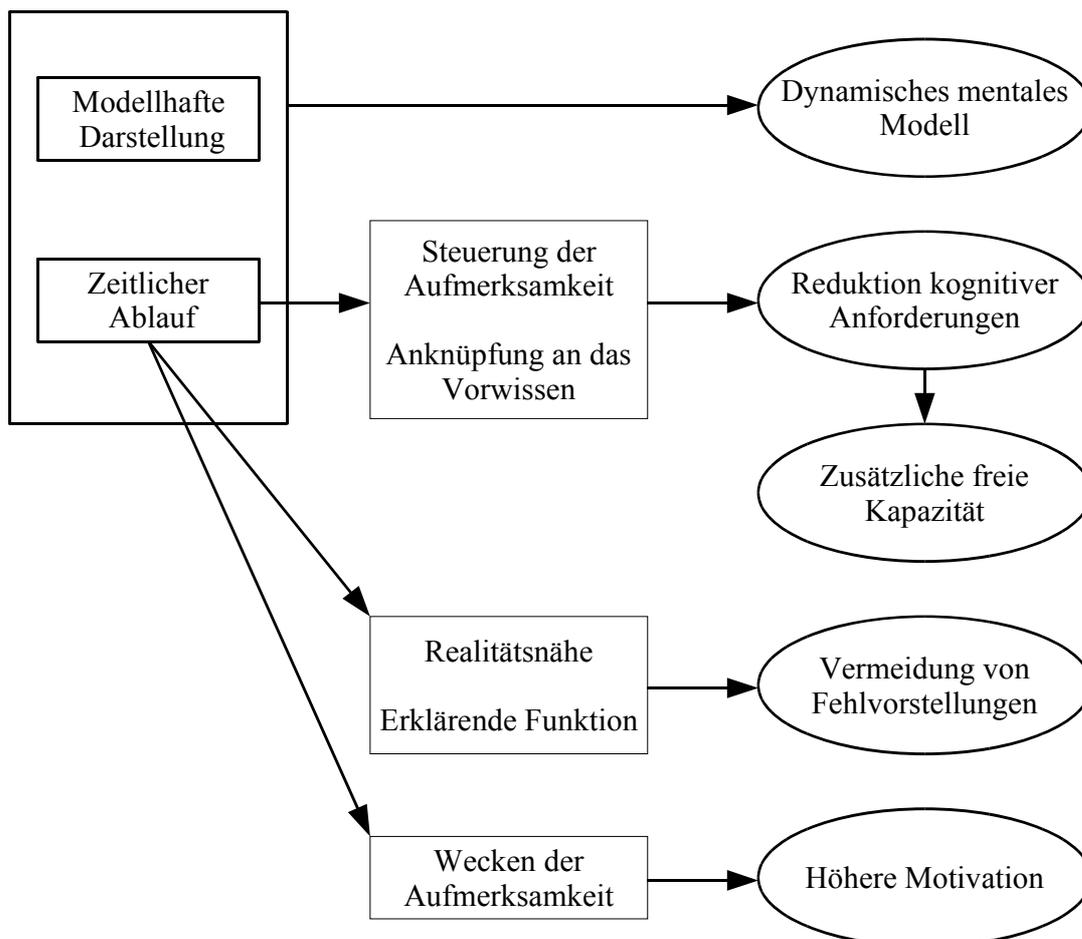


Abbildung 3-2: Mögliche positive Wirkungen von Animationen, die aus ihrem speziellen Charakter abgeleitet werden können.

- Wie bereits im Abschnitt 3.1 beschrieben wurde, besitzen dynamische Elemente der Darstellung eine hohe Prägnanz, die ihre bewusste Wahrnehmung auslöst. Die Animationen bieten an dieser Stelle die Möglichkeit der **Aufmerksamkeitssteuerung** (Park & Hopkins, 1993; Lewalter, 1997a, S.90f; Lowe, 1998, S.126).
- Da unsere Wahrnehmung eher auf die dynamischen Bilder als an die statische Bilder angepasst ist (Marmolin, 1991, 39ff), sollte unser Vorwissen – so die Annahme – eher aus

dynamischen visuellen Vorstellungen und mentalen Modelle bestehen. Animationen können aufgrund ihrer dynamischen Präsentation ein größeres Angebot an Anknüpfungspunkten zum Vorwissen als Bilder bieten. Dies würde die leichtere **Aktivierung des Vorwissens** anhand von Animationen erklären (Weidenmann, 1994, S.531; Lewalter, 1997b, S.215; Lowe, 1998, S.127).

- Die letztgenannten zwei positiven Wirkungen von Animationen können zur **Reduktion kognitiver Anforderungen** bei den Lernenden führen (Salomon, 1994; Schnotz et al., 2001). In folge dessen kann **zusätzliche freie Kapazität** im Arbeitsgedächtnis für andere kognitive Prozesse freigegeben werden, wie z.B. für das inhaltliche Verständnis des dargestellten Prozesses und für die korrekte Einspeicherung in das Langzeitgedächtnis (Rieber & Kini, 1991).
- Als weiterer Vorteil von Animationen wird angenommen, dass sie **Fehlvorstellungen** bezüglich Bewegungen und Prozessen entgegenwirken können (Lewalter, 1997a, S.89f). Dies beruht auf ihrer Funktion der Darstellung von Inhalten. Durch die eindeutige Darstellung einer Bewegung, einer Bewegungsbahn von Objekten und ihres zeitlichen Verlaufs wird eine größere **Realitätsnähe** gewährleistet (Lewalter, 1997b, S.208; Schnotz, 1999, S.43). Weiterhin tritt durch die zeitliche Abfolge von Ereignissen, wie z.B. Ursache-Wirkungs-Beziehungen, eine zusätzliche **erklärende Funktion** hinzu (Lowe, 1998, S.126f; 2003).
- Die unterhaltsamere Informationsdarstellung der Animationen kann die Aufmerksamkeit der Lernenden wecken und die **Lernmotivation** positiv beeinflussen (Rieber & Kini, 1991; Tversky et al., 2002, S.248).

Anhand dieser vermuteten und teilweise belegten positiven Wirkungen könnte man annehmen, dass mit Animationen eine intensivere Unterstützung der Lernende erfolgt, als mit Bildern, die zu messbar besseren Lernleistungen führt. Die bisher vorliegenden empirischen Ergebnisse der psychologischen und fachdidaktischen Forschung zur Wirkung von Animationen sind allerdings uneinheitlich. Eine Auswahl der Befunde, die sich auf naturwissenschaftliche Inhalte beziehen, veranschaulicht die Tabelle 3-1. Weitere fachdidaktische Arbeiten, die sich mit dem Einsatz von Animationen beschäftigen (Kramer, 2005; Rubitzko, 2006), hatten nicht die Zielsetzung, eine Vergleichsuntersuchung von statischen und dynamischen Visualisierungen zu realisieren. Sie konzentrieren sich auf die bisherigen Forschungsergebnisse zur Steigerung der Effektivität von Animationen; deshalb sind sie in der Tabelle nicht vertreten.

Wer/ Wann	Land	Domäne/ Thema	N	Alter/ Gruppe	Ergebnisse
Rieber, 1990	USA	Newtonsche Mechanik	119	4./5. Klasse	Animation besser als Bild
Precht et al., 1998	Deutschland	Neurobiologie	46	Gymnasium, Gesamtschule, 11./12. Klasse	Kein Unterschied
Schnotz et al., 1999	Deutschland	Zeit- und Datumszonen	40	Studierende	Interaktive Animation schlechter als Bild
Dahlqvist, 2000	Schweden	Newton'sche Mechanik	55	Studierende	Kein Unterschied
Nerdel, 2002	Deutschland	Atmungskette Fotosynthese	55 60	Gymnasium, Gesamtschule, 11. Klasse	Kein Unterschied
Lewalter, 2003	Deutschland	Astrophysik	60	Studierende	Kein Unterschied

Tabelle 3-1: Ausgewählte empirische Befunde zum Vergleich Bild vs. Animation (Studien mit naturwissenschaftlichem Lerninhalt; N - Stichprobengröße).

Insgesamt konnten die vermuteten positiven Wirkungen in empirischen Studien nicht eindeutig belegt werden. Aus methodischer Sicht stellt die geringe Vergleichbarkeit der Studien ein Problem dar, da die Versuchsbedingungen sehr unterschiedlich sind. Die Studien stammen aus verschiedenen Domänen, sie wurden mit unterschiedlichen Stichproben, abweichender grafischer Gestaltung und instruktionaler Einbettung, usw. durchgeführt. Die Uneinheitlichkeit der Befunde kann weiterhin – so die These – auf potenziell negative Effekte von Animationen zurückgeführt werden, denen entgegengewirkt werden muss (Slančik et al., 2005, S.390). Die folgenden teils bewiesenen, teils vermuteten negativen Effekte von Animationen können beim Lernen auftreten:

Höhere kognitive Belastung

Animationen können ein flüchtiges Informationsangebot sein. Die Entwickler eines Lernprogramms bestimmen, in welcher Zeit die Information den Lernenden präsentiert wird. Die Lernenden haben somit keine Möglichkeit, den Informationsfluss¹⁴ ihrer eigenen Tagesform und dem individuellen Vorwissen anzupassen. Ein höherer Informationsfluss schränkt die dif-

¹⁴ In einer begrenzten Darbietungszeit aufgenommene Informationsmenge.

ferenzierte Analyse der grafischen Struktur ein (Schnotz, 2001, S.311). Weiterhin müssen die Informationen aus verschiedenen Einzelbildern im Arbeitsgedächtnis gehalten und zueinander in Beziehung gesetzt werden (Lowe, 1998, S.126). Diese Anforderung verursacht bei den Lernenden eine höhere kognitive Belastung. Die „Hemmungsthese“ (Weidenmann, 2002, S.57) betont zusätzlich, dass diese Art der Visualisierung keine „Leerstellen“ für die selbständige Entwicklung von mentalen Vorstellungen zulässt. Gemäss Weidenmann (1993) führt dies vor allem bei Lernenden mit geringem Vorwissen und/oder ungenügenden Lernstrategien zu kognitiver Überlastung, sowie zu oberflächlicher oder bruchstückhafter Verarbeitung (z.B. Verstehenslücken). Die Animationen können dadurch das Lernen verhindern (Plötzner & Lowe, 2004, S.235).

Geringe Verarbeitungstiefe

Die Schüler neigen durch die vermeintlich leicht verständliche Form zur *passiven Beobachtung*, zum „Konsum“ der vorgefertigten Darstellungen („Fernseh-Effekt“, Weidenmann, 1994, S.504; Schnotz, 2001, S.312). Die Lernenden äußern kaum Verständnisschwierigkeiten, obwohl sie nur den Eindruck haben, den Sachverhalt vollständig verstanden zu haben. Wegen dieses subjektiven Eindrucks bringen sie dann geringe Anstrengung auf, um effektive Lernstrategien einzusetzen. Die Information wird dadurch nur *oberflächlich verarbeitet*, was sich negativ auf den Lernerfolg auswirkt („Unterschätzungsthese“, Weidenmann, 2002, S.56). Die Vergleichsuntersuchung „Bild vs. Animation“ von Lewalter (N=60, Studierende, Thema: Astrophysik; 1997b, S.215-219) untermauert auch die „leichte Verständlichkeit“ von Animationen. Die Schüler, die mit der Animationsversion arbeiteten, hatten die Wiederholungsstrategie signifikant seltener verwendet als die Schüler, die sich mit der Bildversion beschäftigten. Erstere gaben außerdem signifikant häufiger an, den Lernstoff verstanden zu haben, obgleich kein Unterschied zwischen den zwei Gruppen im Wissenstest zu messen war. Bei statischen Bildern wurde eine bewusster Beschäftigung und intensivere Steuerung des Lernprozesses festgestellt. Es wurden weiterhin die für den Lernerfolg effektiveren Strategien häufiger eingesetzt. Dies scheint nach Lewalter (1997b, S.220) dazu beigetragen zu haben, die Lernleistung zwischen beiden Gruppen anzugleichen. Demnach benötigen Lernende unter Umständen gar keine dynamischen Darstellungen zur mentalen Unterstützung. Durch die Animationen werden ihnen lernrelevante kognitive Prozesse abgenommen, die sie selbst aktiv und selbständig mental durchführen könnten.

Negative perzeptuelle Dominanz¹⁵

Die dynamischen Elemente der Darstellung besitzen, wie schon mehrfach erwähnt, eine hohe Prägnanz. Diese Eigenschaft kann dann zum Nachteil werden, wenn ihr Inhalt nicht mit der physikalisch relevanten Information übereinstimmt. In Folge dessen erinnern sich die Lernenden nicht an die relevanten Inhalte (N=24, Studierende, Wetterkarten; Lowe, 1998, S.130).

¹⁵ Was bei Lowe unter „perzeptuellen Dominanz“ verstanden wird, ist gleich dem Prägnanz-Begriff vom Abschnitt 2.2.

Aufmerksamkeitsverteilung

Bei der gleichzeitigen Darbietung von Bild und geschriebenem Text müssen die begrenzten Aufmerksamkeitsressourcen innerhalb des visuellen Arbeitsgedächtnisses der Lernenden aufgeteilt werden (Brünken & Leutner, 2001, S.358). Dieser Befund lässt sich auf Animationen übertragen, bei denen mehrere Veränderungen gleichzeitig am Bildschirm stattfinden. Ihre Wahrnehmung und Verarbeitung führt zu einer größeren Belastung der Lernenden. Einen Extremfall stellen komplexe Animationen dar, die zur kognitiven Überlastung bei Novizen führen (Lowe, 1998, S.126).

Fehlvorstellungen

Die spezifische Art visueller Hervorhebungen und das Fehlen spezifischen Wissens kann zur falschen Interpretation von dynamischen Bildern führen und dadurch zu einer Entwicklung von Fehlvorstellungen beitragen (Lowe, 1998, S.133).

Die beschriebenen negativen Effekte treten hauptsächlich bei Novizen auf, wenn diese mit komplexen Animationen arbeiten. **Experten und Novizen** unterscheiden sich unter anderem in der Verarbeitung von bzw. dem Umgang mit (komplexen) dynamischen Darstellungen. Experten können auf bereits bestehende dynamische mentale Modelle zurückgreifen und lenken dadurch ihre Aufmerksamkeit auf thematisch relevante Information. Die Novizen können kein bestehendes mentales Modell im Arbeitsgedächtnis aktivieren, das die Verarbeitung erleichtern würde. Andererseits reichen ihre internen Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses nicht immer aus, um die große Zahl neuer Informationen miteinander in Verbindung zu setzen. Sie greifen dann auf inadäquate Verarbeitungsstrategien zurück:

- Die Aufmerksamkeit wird nur auf ausgewählte Aspekte der Animation gelenkt, die die höchste Prägnanz besitzen. Diese Strategie ist oft falsch, da die prägnanten Stellen nicht unbedingt mit der lernrelevanten Information übereinstimmen.
- Sie rufen im Arbeitsgedächtnis ihr Alltagswissen ab, das unter Umständen für die spezifische Domäne irrelevant ist oder sogar zu falschen Schlussfolgerungen führen kann.

Diese Zusammenhänge mögen zunächst ernüchternd wirken, weil man eigentlich in den meisten Fällen gerade Novizen Lerngelegenheiten bieten möchte. Ein etwas positiveres Bild zeichnet eine empirische Metaanalyse (Höffler & Leutner, 2005; 2006). 76 Einzelvergleiche (Bild vs. Animation) zeigen die Überlegenheit von Animationen mit einer mittleren Effektstärke ($d=0,46$; Höffler & Leutner, 2006, S.3). Bei der Abfrage deklarativen Wissens sind Animationen vergleichsweise deutlicher überlegen als beim Problemlösen ($p<0,05$). Daraus ergibt sich die Frage, wie man Animationen bewusst so gestalten kann, dass man einen positiven Lerneffekt bewirkt. Die negativen Wirkungen von Animationen deuten darauf hin, dass die Bedingungen für ihren Einsatz in Lernmaterialien genauer geprüft werden müssen. Außerdem sollte ihre Gestaltung an die festgestellten bzw. festgelegten Bedingungen (wie z.B. Besonderheiten der Lernenden, des Lerninhalts, der Lernsituation, ...) angepasst werden. Wie das im Rahmen dieser Arbeit geschehen soll, wird im nächsten Abschnitt 3.3 erörtert.

3.3 Optimale Gestaltung von Animationen

Für eine lernförderliche Wirkung von Animationen muss man die Gestaltungsmöglichkeiten des visuellen Designs optimal einsetzen. Es reicht also nicht, die dynamischen Eigenschaften des Lerngegenstandes explizit zu machen. Wesentlich ist die *Art und Weise*, wie diese Dynamik dargestellt wird (Lowe, 1998, S.125). Der Lösungsvorschlag der vorliegenden Arbeit fokussiert auf theoriegeleitet gestaltete und durch Interviews validierte Bilder. Diese, im Sinne des Abschnitts 2.5 „**lernförderliche Bilder**“, werden zu visuellen Grundbausteinen der Entwicklung von Animationen. Die bisherigen Studien vergleichen zwar statische Bilder mit Animationen, aber sie stellen nicht die Frage, ob die Bilder, die animiert werden, lernwirksam sind. „Lernförderliche Bilder“ sind die erste Voraussetzung, die auf dem Weg zu lernförderlichen Animationen erfüllt werden muss. Die nächsten Schritte der Optimierung im physikalischen Kontext richten sich auf die Berücksichtigung von fachdidaktischen, lern- und wahrnehmungspsychologischen Faktoren. Anhand der Erkenntnisse innerhalb dieser Disziplinen wird versucht, den möglichen negativen Effekten von Animationen entgegenzuwirken. Die Gestaltung der Animationen verläuft dann anhand der in den folgenden Abschnitten abgeleiteten Prinzipien. Die entstandenen Animationen werden in nächsten Schritt mit Interviews validiert. Die Vorgehensweise entspricht also derjenigen, die bei der Bildentwicklung angewendet wurde.

A. Fachdidaktisch angemessene Gestaltung

Die Gestaltungsprinzipien von Animationen können nur für *konkrete* fachdidaktische Ausgangsbedingungen festgelegt werden. Über sie muss daher anhand der folgenden Faktoren entsprechend immer neu entschieden werden: die Merkmale der Lernenden, die Komplexität des Lerninhalts, die Lernsituation und die Funktion der Animation im Lernprozess (in Anlehnung an Abschnitt 2.4, Abbildung 2-20). Diese Faktoren und ihre Auswirkung auf die Gestaltung werden im Folgenden erläutert:

A.1. Merkmale der Lernenden

Verschiedene Lernende (z.B. Novizen oder Experten) unterscheiden sich in ihrem themen- und darstellungsspezifischen Vorwissen. Die Anknüpfung an das Vorwissen von Schülern darf nicht nur auf der sprachlichen, sondern muss auch auf der visuellen Ebene geschehen. Wie die Bilder, so sollen auch die Animationen einen Zugang zur visuellen Vorstellung bzw. zum mentalen Modell der Schüler öffnen. Dies geschieht, indem der physikalische Inhalt mit **bekanntem Bildelementen** dargestellt wird. Die Arbeit mit Bildern und Animationen erfordert weiterhin andere Kompetenzen auf der Lernerseite als Textarbeit. Zu entscheidenden Lernermerkmalen werden das räumliche Vorstellungsvermögen (Abschnitt 5.2) und das darstellungsspezifische Vorwissen gezählt.

Negative Effekte von Animationen (Abschnitt 3.2) kommen im Lernprozess zustande, wenn die kognitiven Anforderungen an die Lernenden zu niedrig (geringe Verarbeitungstiefe) oder zu hoch sind (höhere kognitive Belastung, Aufmerksamkeitsverteilung, negative perzeptuelle Dominanz, Fehlvorstellungen). Fachdidaktisch gerecht zu gestalten heißt deswegen, die kogn-

tiven Anforderungen auf die Lernenden abzustimmen. Das folgende Diagramm (Abbildung 3-3) soll darstellen, wie die kognitiven Anforderungen mit der Fähigkeit der Lernende zusammenhängen. Der Zusammenhang muss nicht linearer Natur sein, sie dient nur der Veranschaulichung.

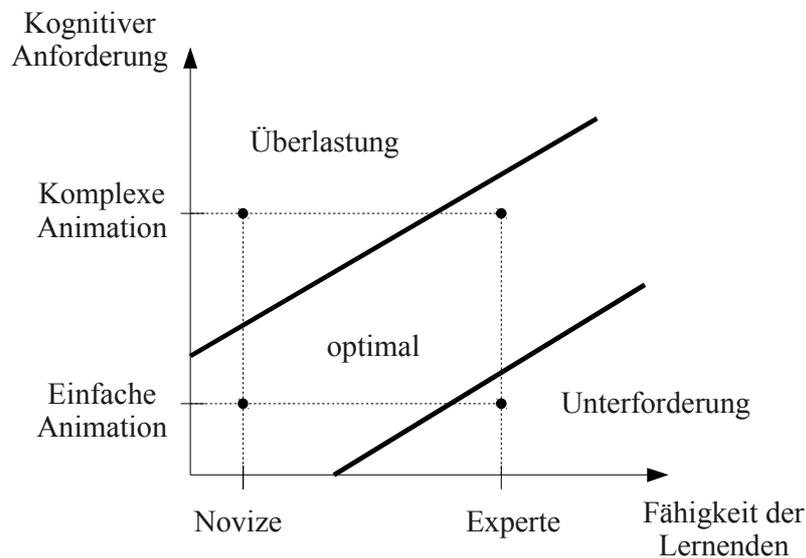


Abbildung 3-3: Die kognitiven Anforderungen der Lernenden bei einfachen und komplexen Animationen in Bezug auf ihre Fähigkeiten. Im dargestellten Phasendiagramm sind die Bereiche der Überlastung, optimale Belastung und Unterforderung eingezeichnet.

Die Verarbeitung einer einfachen Animation bedeutet für die Novizen eine optimale Belastung, hingegen überfordert eine komplexe Animation ihr Auffassungsvermögen. Die Novizen erleben das als Überlastung. Die Experten sind mit einer komplexen Animation optimal belastet, eine einfache Animation würde sie unterfordern. Daher empfiehlt es sich bei Schülern, die mit dem physikalischen Inhalt nur wenig Erfahrung haben, **einfache Animationen** einzusetzen. Um Fehlvorstellungen zu vermeiden, sollen mit Animationen **validierende Interviews** geführt werden. Anhand der Aussagen von Schülern aus einer konkreten Altersgruppe sollten die Animationen in einem letzten Schritt weiter verbessert werden.

A.2. Komplexität des Lerninhalts

Der physikalische Inhalt des Lernmaterials und die Gestaltung der Animation sollen aufeinander abgestimmt werden, so dass die Lernenden die thematisch relevanten Informationen erkennen und diese dem Inhalt entnehmen können. Der Lerninhalt bestimmt zwar die Darstellung, ihre Komplexität soll aber trotzdem **an die Lernenden angepasst** sein (Abbildung 3-3). Die komplexe Animation im Falle eines Novizen braucht eine Optimierung. Dies geschieht durch den „Zoom-Effekt“¹⁶, die Anpassung der Bildgröße an die Informationsdichte (Ab-

¹⁶ Es wird zuerst die Makrostruktur der komplexen Sachverhalt dargestellt, dann wird stufenweise auf die lernrelevanten Teilaspekt „gezoomt“. Dieser Vorgang ist beliebig oft mit unterschiedlichen Teilaspekten wiederholbar.

schnitt 2.3) und/oder durch stufenweise Einblendung der Bildelemente (Lowe, 1998, S.128). Es hört sich zwar trivial an, dass **nur dynamische Inhalte dynamisch dargestellt** werden sollten, aber es ist eine wichtige Bedingung für den effektiven Einsatz von Animationen. Park & Hopkins (1993, S.427, übersetzt von Rubitzko, 2006, S.100) führen in diesem Zusammenhang folgende dynamische Inhalte auf:

- a) Demonstrieren von nacheinander abfolgenden Handlungen,
- b) Simulieren kausaler Modelle bei komplexem Verhalten eines Systems,
- c) Explizite Darstellung von unsichtbaren Abläufen eines Systems,
- d) Darstellung eines Vorgangs, der sprachlich schwer zu beschreiben ist,
- e) Bereitstellen einer visuellen Analogie für ein abstraktes und symbolisches Konzept.

In der Physik finden sich zahlreiche solcher Verfahren; deswegen scheint der Einsatz von Animationen auch beim Lernen von Physik sinnvoll zu sein. Dabei muss es auf die physikalische „Richtigkeit“ und gleichzeitig auf die didaktische Angemessenheit des Gezeigten geachtet werden.

A.3. Lernsituation

Die Anzahl der Schüler, die Unterrichtsmethode des Lehrers, die zur Verfügung stehenden Computer und Räumlichkeiten entscheiden, in welcher Form eine Animation sinnvoll einzusetzen ist. Sie eignet sich als Projektion an der Leinwand, aber sie kann auch in einem Lernprogramm eingebettet sein. Was die Lernzeit und die Anregung der Eigenaktivität von Schülern betrifft, reicht die lernpsychologische bzw. fachdidaktische Forschung noch nicht so weit, dass man konkrete Empfehlungen geben könnte. Anhand der Ergebnisse zur Bildgestaltung (Abschnitt 2.4) lässt sich aber annehmen, dass im Falle einer begrenzten Lernzeit und einer erhöhten Selbstbeteiligung der Schüler, **einfache, handgezeichnete Animationen** hilfreicher für den Wissenserwerb sind als komplexe bzw. computererstellte dynamische Visualisationen.

A.4. Funktion der Animationen

Aus fachdidaktischer Sicht hat sich die Auswahl von Methoden und Medien allgemeineren Zielen unterzuordnen. Dementsprechend soll der Einsatz von Animation einem Lernziel untergeordnet sein. Es muss daher bedacht werden, ob und welche spezifische Lernwirkung von der Animation zu erwarten ist, und an welcher Stelle des Lernprozesses ihr Einsatz am sinnvollsten ist. Erst durch diesen gezielten Einsatz wird die Animation fachdidaktisch begründet und erwünscht sein. Da mit Animationen Prozesse und dynamische Sachverhalte abgebildet werden, entsprechen sie mehr der Konstruktionsfunktion als der Zeigefunktion von Bildern (Abschnitt 2.4, Punkt 4). Diese Konstruktionsfunktion ist wiederum in der „*facilitating function*“ (Abschnitt 3.2) enthalten, d.h. in der Unterstützung beim Aufbau dynamischer mentaler Modelle. Auf die weiteren Funktionen von Animationen wurde schon im vorigen Abschnitt umfassend eingegangen.

B. Lernpsychologisch angemessene Gestaltung

Bedingungen für die Gestaltung lassen sich, wie weiter oben schon angedeutet, aus Arbeiten der Kognitionspsychologie der letzten zehn Jahre und der älteren Wahrnehmungspsychologie ableiten. Dadurch wird eine Erleichterung der Informationsverarbeitung und Aufhebung der negativen Effekte in folgender Weise erwartet:

B.1. Reduktion äußerer kognitiver Belastung

Es kann nur eine bestimmte Menge an Informationen verarbeitet werden (*limited capacity*). Deshalb sollte entweder wenig Information dargeboten werden oder im Fall eines komplexen Lerninhalts sollte durch die Gestaltung die äußere kognitive Belastung vermindert werden.

Einfachheit

Die dynamischen Inhalte sollen in Form von einfachen Veränderungen umgesetzt werden. Einfachheit bedeutet im Sinne dieser Arbeit, dass in der Animation nur eine Bewegung auf einmal stattfindet und als visuelle Grundlage einfache Bilder dienen. Außer der verringerten kognitiven Belastung ist ein weiterer Vorteil dieser Darstellung, dass die Animation leicht wahrgenommen und begriffen werden kann (Bétrancourt & Tversky, 2000; Morrison et al., 2000).

Steuerungscode (cues)

Steuerungscode bestehen aus farblich hervorgehobenen Bildelementen, Hinweis Pfeilen, Fachbegriffen und werden im Laufe der Animation eingeblendet. Sie lenken die Aufmerksamkeit auf bestimmte Inhalte; so werden dem Lernenden Suchprozesse gespart. In einer Studie (N=129, 11.-13. Klasse, Zellenbiologie; Huk et al., 2003a, S.692f) erreichen Schüler durch diese Unterstützung signifikant bessere Ergebnisse im Nachtest als Schüler ohne diese Signale. Die Steuerungscode unterstützen Schüler mit niedrigem und hohem räumlichen Vorstellungsvermögen (RV) gleich, wobei Schüler mit hohem RV mit beiden Animationsversionen bessere Ergebnisse als Schüler mit niedrigem RV erzielen (Huk et al., 2003b, S.2658).

2D-Darstellung

Die konventionelle Produktion von Lernmaterialien ist auf 3D-Animationen gerichtet. Die Frage ist, ob sie wirklich so lernförderlich sind, wie man das glauben mag. Eine Studie (N=188, Studierende, Zellenbiologie; Huk et al, 2003c, S.1189) verglich 2D- und 3D-Darstellung einer Animation miteinander. Die Studenten wurden anhand von fachspezifischem Vorwissen in zwei Gruppen eingeteilt. Die Ergebnisse zeigen, dass Studenten mit hohem Vorwissen von 2D-Animation profitieren, während Studenten mit niedrigem Vorwissen die gleiche Leistung mit beiden Animationsversionen erzielen. Die Autoren erklären dies dadurch, dass eine 2D-Darstellung die Information in reduzierter Form anbietet. Eine 3D-Animation kann zur zusätzlichen kognitiven Belastung führen, und dadurch den Lernerfolg reduzieren. Der Einsatz einer sorgfältig erstellten 2D-Animation scheint für beiden Gruppen gerechtfertigt zu sein.

Individuelles Lerntempo

Schaltflächen sollen die Steuerung des Ablaufs durch den Lernenden ermöglichen, d.h. die Animation soll in unterschiedlicher Geschwindigkeit, sowie vorwärts und rückwärts abgepielt werden können. Sie sollte angehalten werden können und sowohl kontinuierlich, als auch schrittweise ablaufen (Lowe, 1998, S.128). So wird die Menge der dargestellten und zu verarbeitenden Information individuell kontrolliert.

Gestaltungsprinzipien des Multimedialernens

Die Gestaltungsprinzipien für Text-Bild-Kombination (Abschnitt 1.3) lassen sich auf die Animationen und Texte übertragen (Mayer & Moreno, 2002). Es entstehen folgende Richtlinien:

- **Multimediaprinzip:** Diesem wird schon dadurch Rechnung getragen, dass zusätzlich zu den Texten Animationen eingesetzt werden.
- **Kohärenzprinzip:** Die Animation darf nicht ausschließlich der Motivationsfunktion dienen, sondern sie soll lernrelevante Inhalte darstellen.
- **Redundanzprinzip:** Zu der Animation wird der Text nur auditiv dargeboten, auf die geschriebene Form wird verzichtet. Dieses Prinzip schließt aber die Einblendung von Fachbegriffen nicht aus.
- **Kontiguitätsprinzip:** Die Begriffe sollen auf dem Bildelement eingeblendet werden, die sie bezeichnen (räumliche Nähe). Der gesprochene Text und der Ablauf der Animation sollen aufeinander abgestimmt sein (zeitliche Nähe).
- **Modalitätsprinzip:** Der Text wird zur Animation auditiv dargeboten.

B.2. Tiefere Verarbeitung

Wie im Abschnitt 3.2 schon beschrieben, ist die kognitive Aktivität von Lernenden das Ausschlaggebende im Lernprozess. Deswegen sollen, um eine tiefere Verarbeitung von Animationen zu erreichen, die **Lerneraktivitäten** gefördert werden (Lewalter, 1997b, S.220). Die Aktivitäten von Schülern sollten im Vorfeld genau überlegt werden: Was wird das beim Lernenden bewirken und welche kognitive Aktivität wird dadurch ausgelöst? Was ist eine optimale Lerneraktivität, die eine möglichst aktive Verarbeitung des Lerninhalts auslöst? Die Interaktivität beim Lernen mit Multimedia kann zwar die Schüleraktivität fördern und dadurch positiv auf die Lernleistung auswirken. Dies konnte aber empirisch nicht immer belegt werden (vgl. Mayer & Chandler, 2001 vs. Schnotz et al., 1999). Deswegen konzentriert sich diese Arbeit auf schriftlichen Lerneraktivitäten und nicht auf die Steuerungsinteraktion (Strzebkowski & Kleebergs, 2002). Detaillierter befasst sich das Kapitel 4 damit.

C. Wahrnehmungspsychologisch angemessene Gestaltung

Wir gehen davon aus, dass die Lernenden durch die Erleichterung der Wahrnehmung von wichtigen Inhalten und durch die Steuerung der Aufmerksamkeit kognitiv weniger belastet werden (Abschnitt 2.2 und 2.3). Die Zielsetzung bei der Suche nach der optimalen Gestaltung ist also weiterhin, negativen Effekten und Gefahren beim Einsatz von Animationen vorzubeu-

gen. Die erste Gestaltungsrichtlinie versucht, eine negative perzeptuelle Dominanz aufzuheben (C.1.), die zweite will einer Aufmerksamkeitsverteilung entgegenwirken (C.2.). Da die „Gesetze des Sehens“ schon in der Voraussetzung eines „lernförderlichen Bildes“ enthalten sind, soll das Augenmerk hier nur auf dem richtigen Einsatz der Bewegung liegen:

C.1. Optimale Prägnanz für zentrale physikalische Inhalte

Die Bewegung in der Animation besitzt eine hohe Prägnanz, d.h. die Aufmerksamkeit der Schüler wird automatisch auf dynamische Inhalte gelenkt. Das ist ein zusätzlicher Vorteil von Animationen, den man bei Bildern nicht hat. Die Frage bleibt allerdings, ob diese Dynamik den physikalischen Inhalt unterstützt, ob das Prägnante auch das Wichtige ist. Die Bewegung muss also optimal gewählt werden. Es dürfen nur diejenigen Teile einer Animation prägnant sein, die einen unmittelbaren Einfluss auf den Lernprozess haben. Andere, für den Ablauf des Lernprozesses unwesentliche Teile, dürfen nicht die visuelle Wahrnehmung für sich beanspruchen, da sie sonst die Effektivität des Lernprozesses verringern. Es sollen die physikalisch wichtigen Inhalte dynamisch dargestellt werden. Wenn die relevante Information jedoch keinen dynamischen Charakter hat, ist es besser bei statischen Bildern zu bleiben.

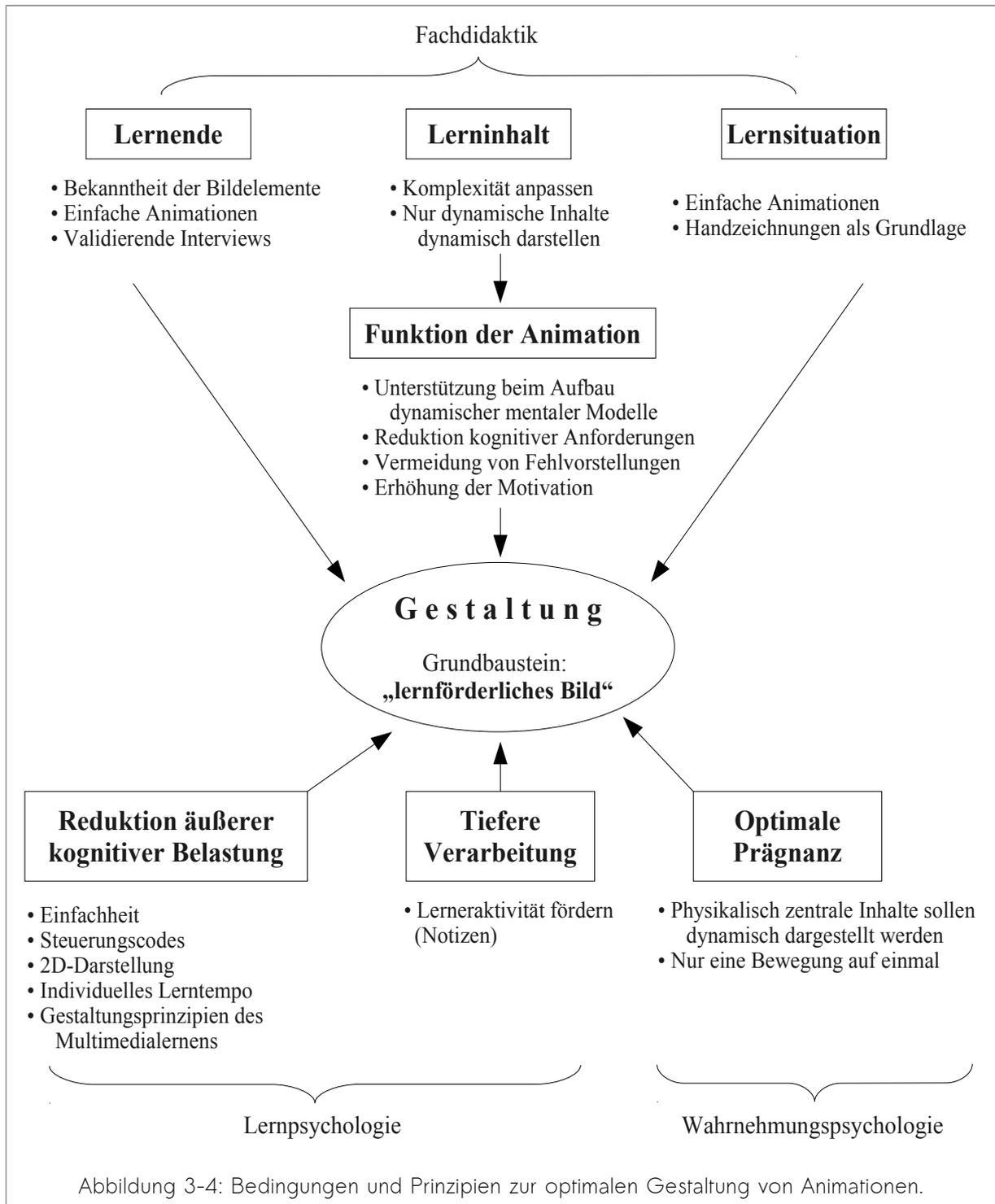
C.2. Nur eine Bewegung auf einmal

Die Gestaltungsprinzipien basieren unter anderem auf dem Verständnis der kognitiven Verarbeitung dynamischer visueller Information. Auch wenn man drei Subsysteme der Informationsverarbeitung annimmt (Abschnitt 3.1), so steht in jedem Kanal immer nur eine begrenzte Kapazität zur Verfügung. Eine gleichzeitige Bewegung an mehreren Stellen des Bildschirms kann diesen Rahmen sprengen und bei den Lernenden zur kognitiven Überlastung führen. Deswegen ist es sehr wichtig, dass in einer Animation immer nur eine Bewegung stattfindet. In der Klassifikation von Lowe entspricht dies der einfachen Animation. Zu einem Widerspruch kommt man, wenn der dynamische Charakter eines komplexen Sachverhalts visualisiert werden soll. Es bietet sich an, eine Darstellungsoption einzubauen: Die Lernenden könnten bestimmte Objekte auswählen, um deren Verhalten im einzelnen zu verfolgen. Die übrigen Elemente würden verschwinden (Lowe, 1998, S.128). Diese Maßnahmen erleichtern besonders Novizen das Lernen. Somit könnten sie komplexe Animationen in reduzierter Form kognitiv verarbeiten. Dieses Gestaltungsprinzip unterstützt die selektive Informationsextraktion: Die Aufmerksamkeit der Lernenden wird nacheinander auf ausgewählte Aspekte der Animation gerichtet.

Zusammenfassung

Ein Ziel dieser Arbeit ist die Optimierung der Animationen in themenspezifischen Kontexten. Außerdem möchte diese Arbeit zu einem bewussten Einsatz von Animationen in Lernprogrammen beitragen. Beide Ziele können auf der theoretischen Grundlage der Fachdidaktik, der Lern- und Wahrnehmungspsychologie angestrebt werden. Aus diesen Disziplinen wurden Prinzipien für die Gestaltung abgeleitet, so dass die Erwartung begründet ist, möglichen negativen Effekten von Animationen entgegen zu wirken. Dadurch können Animationen ihre

Funktionen besser erfüllen. Diese Gestaltungsprinzipien (Abbildung 3-4) sind aber keine generellen Richtlinien für die „optimale“ Gestaltung. Sie sind für konkrete Lernprozesse immer neu festzulegen. Der positive Lerneffekt von Animationen ist dann durch die Anwendung der einzelnen Gestaltungsprinzipien und durch ihr lebendiges Zusammenspiel zu erreichen.



Einen Überblick der Gestaltungsprinzipien von Animationen in der vorliegenden Arbeit bietet Abbildung 3-4. Es sollen einfache 2D-Animationen erstellt werden. Als visuelle Grundbausteine werden handgezeichnete Bilder herangezogen, die der Bedingung entsprechen, als „lernförderliche Bilder“ zu gelten. Als Steuerungscode sollen Farben und Pfeile eingesetzt werden. Es sollen weiterhin die Gestaltungsprinzipien des Multimedialernens beachtet werden. Eine individuelle Steuerung des Ablaufs soll gewährleistet werden. Es dürfen ferner nur dynamische und gleichzeitig physikalisch zentrale Inhalte animiert werden. In diesen Visualisierungen darf nur eine Bewegung auf einmal stattfinden. Die Verständlichkeit und Anschaulichkeit der Animationen sollen mit validierenden Interviews gesichert werden. Eine tiefere Verarbeitung soll zusätzlich mit einer Lerneraktivität (Anfertigung von Notizen) gefördert werden. Die Entwicklung von Animationen anhand dieser Gestaltungsprinzipien wird im Abschnitt 7.4.2, die Ergebnisse der validierenden Interviews werden im Abschnitt 7.5 beschrieben.

4 Notizen

„... eine Übersetzungsfähigkeit von nichtlinearen Gedanken
zu linearer Sprache“
(Kisfaludy György)

4.1 Schreiben als kognitive Aktivierung

In Mayers Theorie des Multimedialernens wird das Lernen als Wissenskonstruktion aufgefasst (Abschnitt 1.2). Um diese aktive Verarbeitung des Lerninhalts zu unterstützen bzw. die Tiefe der Verarbeitung zu steigern, bietet sich an, das Schreiben einzusetzen. Dabei sollen die folgenden zentralen Fragen geklärt werden: Inwieweit kann das Schreiben diesem Zweck dienen? Wie soll eine Schreib-Instruktion formuliert werden, damit eine tiefe Verarbeitung des Lernstoffs zu Stande kommt? Um diese Erwartungen rechtfertigen zu können, werden in diesem Abschnitt die theoretischen Grundlagen geklärt: Es wird beschrieben, welche kognitiven Prozesse das Schreiben beim Menschen erfordert und welche Wirkungsweise das Schreiben auf das Lernen hat. Weiterhin soll das Schreiben in den Stand der Unterrichtsforschung (kognitive Aktivierung) eingeordnet werden.

Schreiben aus der kognitionspsychologischen Sicht

Hayes & Flower (1980) haben das Schreiben als psychischen Prozess mit der Methode „lautes Denken“ untersucht. Sie modellieren den Prozess des Schreibens als einen auf ein Ziel gerichteten, hierarchisch gegliederten Vorgang: Am Anfang werden die Hauptziele des Schreibvorhabens definiert, anschließend entwickeln die Schreiber untergeordnete Ziele. Dies geschieht nach dem Sammeln von Ideen (*brainstorming*), die dann hierarchisch angeordnet werden. Die Schreiber benutzen dabei vornehmlich drei mentale Prozesse:

- **Planen** (*planning*)
Ausreichendes Wissen über das Thema ist eine Voraussetzung für das Schreiben (*the writer's long term memory*). Da das Wissen auf sehr unterschiedliche Art und Weise gespeichert ist, sind auch die Schreibpläne dementsprechend komplex. Dabei ist strategisches Wissen über die schrittweise Realisierung des Schreibplans notwendig. Es ist außerdem zu bedenken, dass jedes Thema eine für die Leserschaft angemessene sprachliche Umsetzung erfordert.
- **Satzgenerieren** (*translating*)
Die entwickelten Schreibpläne werden schrittweise in Sätze "übersetzt" (*translating*). Meist werden Sätze in kleineren Einheiten erzeugt und geschrieben.
- **Revidieren** (*reviewing*)
Der produzierte Text wird anschließend gelesen und dabei überprüft, ob er zu den Zielen

des Schreibvorhabens passt. Gegebenenfalls wird der Text dabei verändert. Mit dem Text wird solange gearbeitet, bis er an das Vorwissen anknüpft. Das neu entstandene Schreibprodukt muss nämlich anhand des Vorwissens z.B. auf Widersprüchlichkeiten hin geprüft werden. Das tun jedoch nur die erfahrenen Schreiber: Sie kontrollieren den produzierten Text eingehend und nehmen Änderungen vor. Novizen haben jedoch kaum kognitive und/oder zeitliche Kapazitäten für diese Revisionsprozesse.

Wenn man dieses Modell des Schreibprozesses mit Mayers Theorie der Informationsverarbeitung (Abschnitt 1.2) verbindet, kann man im optimalen Fall behaupten, dass alle Verarbeitungsprozesse (Auswählen, Organisieren, Integrieren der Information) während des Schreibens nacheinander und wiederholt ablaufen: In der Phase des Planens und Satzgenerierens entstehen dann zwangsläufig verbale und piktoriale mentale Modelle. Weiterhin kann jede Phase des Schreibens das Vorwissen aktivieren. Die Frage bleibt nur, ob dies mit der aktuellen Information verknüpft wird und ein integriertes mentales Modell entstehen kann, was in der Phase des Revidierens der Fall ist. Insgesamt kann man behaupten, dass *mit Hilfe der Textproduktion mentale Modelle aufgebaut* werden.

Schreiben in der Unterrichtsforschung: kognitive Aktivierung

Den psychologischen Hintergrund des Schreibens in der Unterrichtsforschung bildet die kognitive Aktivierung der Lernenden. Die kognitive Aktivierung ist eine Grunddimension der Unterrichtsqualität. Sie spiegelt die Komplexität von Aufgabenstellungen und Argumentationen wider und bestimmt damit die Intensität des fachlichen Lernens. Daraus folgt, dass sie in unmittelbarem Zusammenhang mit dem *Lernzuwachs*, sowie mit der *Zunahme des fachlichen Verständnisses* von Schülern steht (Klieme et al., 2001, S.51ff; Klieme & Rakoczy, 2003; Lipowsky, 2006). Die Merkmale für einen kognitiv aktivierenden Mathematikunterricht sind – unter anderem – die anspruchsvollen Schülerarbeitsphasen, in denen verschiedene Vorwissensbestände untereinander und mit neuem Wissen verbunden werden (Klieme & Baumert, 2001b), d.h. es findet eine Vernetzung der mentalen Modelle statt. Ein kognitiv aktivierender Unterricht regt also die Schüler zu ähnlichen kognitiven Prozessen an, wie das Modell des Schreibens (Hayes & Flower, 1980) postuliert. Starauschek drückt es in folgender Weise aus (2008, 10. Folie):

„Schreiben ist mehr als die technische Herstellung von Buchstabenfolgen. Es geht um **sinnproduzierendes Schreiben** (Wissensorganisation und -produktion).“

Im Prozess des Schreibens wird die neue Information mit dem bestehenden Wissen abgeglichen, d.h. die Lücke zwischen neuen und vorhandenen mentalen Modellen wird geschlossen. Das Reorganisieren des Vorwissens kann dabei manchmal notwendig sein. In diesem Prozess entsteht neues Wissen für die Lernenden. Das Schreiben erleichtert dabei durch die Wissensdarstellung das Arbeitsgedächtnis und erfordert die Verwendung von metakognitiven Strategien. Daraus könnte der Schluss gezogen werden, dass die eigene Textproduktion den Lernzuwachs fördert, insofern könnte das *Schreiben als eine Methode der kognitiven Aktivierung* akzeptiert werden.

Welches Argument spricht noch für den Einsatz des Schreibens? In der Kognitionspsychologie und in der physikdidaktischen Forschung zählt neben dem Problemlösen *das sprachliche Modellieren* zu den Merkmalen, die das Expertentum auszeichnen (Starauschek, 2008). Gerade darum geht es bei dem Prozess des Schreibens: das sprachliche Modellieren von Inhalten. Trotzdem wird die Schreibkompetenz im Unterricht nicht gefördert, weil ihre Entwicklung als abgeschlossen angesehen wird. Schreiben kann also als kognitive Aktivierung

- ein Angebot für selbstständiges, eigenverantwortliches Lernen und
- eine Anregung zum vertieften Nachdenken und dem damit verbundenen Aufbau mentaler Modelle sein.

Nun bleibt die Frage, wie man durch die Instruktionen „sinnstiftendes Schreiben“ anregen kann. Der nächste Absatz soll sich der Beantwortung dieser Fragestellung nähern.

Anregung der aktiven Verarbeitung (Verarbeitungstiefe)

Das Schreiben kann unterschiedliche Qualität haben. Es ist nicht zwangsläufig „sinnstiftend“ oder kognitiv aktivierend. Genauso wie beim Lernen, ist auch hier die Verarbeitungstiefe entscheidend. Je nach Ausmaß der eingesetzten kognitiven Aktivitäten sind zwei wesentliche Ebenen zu unterscheiden (Craik & Lockhart, 1972; Haberlandt, 1999), die, aus Sicht der vorliegenden Arbeit, zwei unterschiedlichen Arten des Schreibens entsprechen könnten:

- *Oberflächliche, perzeptuelle Verarbeitung* (Schriftbild und Wortklang)
Der Lernende verwendet eine primitive Behaltensstrategie, er memoriert Inhalte. Die entstehende Gedächtnisspur ist nur kurzfristiger Natur. Auf dieser Ebene ist Schreiben eine technische Herstellung von Buchstabenfolgen (Graphomotorik), ähnlich wie es der Fall ist, wenn ein Schreiber einen Text diktiert bekommt.
- *Tiefere, semantische Verarbeitung*
Eine tiefere Analyse der Bedeutung einer Information führt dazu, dass die Information verstanden und stärker mit semantischem Hintergrundwissen der Lernenden verbunden wird. Diese Gedächtnisspuren werden dadurch dauerhafter. Dies entspricht im Modell von Mayer der „Organisation“ (Sinnentnahme) und „Integration“ (Verbindung mit dem Vorwissen). Die Bildung des kohärenten mentalen Modells wird zusätzlich mit metakognitiven Strategien gesteuert. Nur wenn Verstehensprobleme auftauchen, die mit den automatisierten Prozessen nicht bewältigt werden können, geschieht eine bewusste Reflexion. Diese Ebene entspricht dem sinnproduzierenden Schreiben.

Die Tiefe der Verarbeitung steht meines Erachtens in einer wechselseitigen Beziehung mit der Art des Schreibens: einerseits kann durch ein sinnproduzierendes Schreiben eine tiefe Verarbeitungsebene aktiviert werden, andererseits eine tiefe Verarbeitung ein sinnproduzierendes Schreiben anregen.

In unterschiedlichen Studien konnte gezeigt werden (Craik & Lockhart, 1972; Craik & Tulving, 1975), dass die Lernenden bei der semantischen Verarbeitung die beste Behaltensleistung erreichen. Es ist weiterhin bekannt, dass diese Gedächtnisleistung vor allem mit Wie-

derholungsstrategien unterstützt wird, während die Nutzung von metakognitiven Strategien das Verständnis fördert (Lewalter, 2003)¹⁷. Den aufgeführten Ebenen entsprechend gibt es zwei Möglichkeiten, um die Lernleistung zu erhöhen:

- eine wiederholte Darbietung der Information bei geringer Verarbeitungstiefe (z.B. einen Satz immer wieder aufschreiben) oder
- die Erhöhung der Verarbeitungstiefe durch die Anregung einer inhaltlich orientierten Verarbeitung.

Die Instruktion soll also so formuliert werden, dass sie von dem Lernenden verlangt, sich mit der aufgenommenen Information intensiv und bewusst auseinanderzusetzen. Die induzierten Lerneraktivitäten sollen das Organisieren und Integrieren von Information unterstützen. Einige Beispiele dafür sind (Mietzel, 2007; van der Meer, 1996, S.221ff):

- *Organisieren*: Lernstoff ordnen (Wesentliches von Unwesentlichen trennen), wichtige Passagen kennzeichnen, Übersichten und Zusammenfassungen erstellen. Hierzu gehören auch Methoden der Bedeutungsgenerierung, wie zum Beispiel Fragen stellen und Relevanz verdeutlichen.
- *Integrieren*: In diesem Prozess zwischen Arbeits- und Langzeitgedächtnis sollte das neue Wissen mit dem Vorwissen verbunden werden. Dies geschieht leichter, wenn Alltagssituationen, Sachgebiete bzw. gelernte Inhalte im Zusammenhang mit dem Lernstoff vor der Wissensvermittlung verdeutlicht werden. Damit wird das Vorwissen aktiviert und Vergleiche, Zusammenhänge, Alternativen und Bezüge zu Bekanntem können aufgezeigt und erarbeitet werden. Die Inhalte werden anhand des Vorwissens kritisch hinterfragt und weitere Anwendungen werden gesucht.

Die hier aufgezählten Lerneraktivitäten sind eine erste praktische Annäherung zur semantischen Verarbeitung durch das Schreiben. Um die Entwicklung von Schreibfähigkeit und den damit verbundenen Aufbau kognitiver Fähigkeiten differenzierter zu betrachten, soll das heuristische Modell von Bereiter (1980, S.82-88) herangezogen werden. Er teilt das Schreiben in folgende sechs Wissens- und Fähigkeitssysteme ein, die eine voll entwickelte Schreibkompetenz ausmachen:

1. Graphomotorische Routinen (herstellen von Buchstabenfolgen, entsprechend einer oberflächlichen Verarbeitung)
2. Assoziatives Schreiben (generieren von Ideen zum Schreibthema, aufschreiben des Wissensstands, noch ohne Orientierung am Text)
3. Performatives bzw. normbewusstes Schreiben (beherrschen der Schreibkonventionen mit orthografischen und stilistischen Routinen)
4. Kommunikatives Schreiben (berücksichtigen des Standpunkts, Wissens und der Interessen potentieller Leser)

¹⁷ An dieser Stelle ist zu ergänzen, dass Schreiben zu einer besseren Transferleistung erst dann beitragen kann, wenn auch Revisionsprozesse ablaufen.

5. Textgestaltendes Schreiben (kritische Distanz im Hinblick auf Inhalt und Form zum eigenen Produkt einhalten, globale Kohärenz etwa durch Rückkehr auf eine Eingangsfrage erreichen)
6. Epistemisches¹⁸ Schreiben (reflektieren, Schreiben als Suche nach Bedeutung, Schreiben als integraler Bestandteil des Denkens).

Zwar kann sich jede Bereich unabhängig von den anderen entwickeln, bei Novizen entwickeln sie sich jedoch erst nach und nach. Um eine möglichst tiefe Verarbeitung der Lerninhalte zu erreichen, müsste die Instruktion bei den Schülern eine „Schreibqualität“ ab der Stufe vier auslösen. Auf welcher Stufe sich Schüler im naturwissenschaftlichen und Sachunterricht befinden, ist offen. Die Forschungsergebnisse zeigen die Möglichkeit für positive Lerneffekte auf: Schreiben kann nicht nur eine bessere Behaltensleistung, sondern auch ein besseres Verständnis bewirken (Priemer, 2004; Wallace et al., 2004; Patterson, 2001). Die positiven Effekte auf den Wissenserwerb von Probanden können aber auch gering ausfallen (Eigler et al., 1987) oder völlig ausbleiben (Nieswandt, 1997, S.331; Bergeler & Prospiech, 2008). Diese unterschiedlichen Ergebnisse zeigen, dass die Tiefe der induzierten kognitiven Verarbeitung entscheidend für den Wissenserwerb ist.

Beim Einsatz von Schreiben im Physikunterricht kann man weiterhin mit physikspezifischen Besonderheiten (Becker-Mrotzek, 2007, Folie 29-38) und mit einer offenen Haltung von Schülern rechnen (Bergeler, 2009, S.30). Viele praktische Beispiele für Schreibsituationen finden sich bei Josef Leisen (2008), die jedoch für diese Untersuchung keine Relevanz besitzen. Für die vorliegende Arbeit wurde eine Schreibmethode gewählt, die als „externale Repräsentation“ eingestuft werden kann.

4.2 Der Einsatz von Notizen

„Das Anfertigen externaler Repräsentationen wie Notizen, Tabellen, Grafiken oder Skizzen stellt eine aus pädagogisch-psychologischer Sicht sinnvolle und wünschenswerte Lernstrategie dar, deren Ziel es ist, relevante Informationen auszuwählen und miteinander in Beziehung zu setzen.“ (Seufert & Brünken, 2005) Dieses Zitat hebt die zentrale Eigenschaft von Notizen hervor: das Organisieren von neuem Wissen (Abschnitt 1.2). Damit bewegen wir uns mit dieser Schreibmethode auf der Ebene der tiefen, semantischen Verarbeitung (Abschnitt 4.1).

Eine hilfreiche Begleiterscheinung beim Anfertigen von Notizen ist das wiederholte Lesen des Lernmaterials. Damit stellt das Anfertigen von Notizen eine Wiederholungsstrategie dar (Lewalter, 1997a). Mit der Wiederholung geht auch ein „Ausschälen“ der wesentlichen Inhalte einher: Die Schüler müssen selbst überlegen, was von dem Lernmaterial für sie wichtig ist und damit notiert wird. Deshalb könnte diese Methode die kognitive Aktivität beim Lernen erhöhen. Obwohl die Inhalte oft nur kopiert werden, erstellen die Schüler eine Art äußere Gedächtnisstütze, was die Belastung ihres Arbeitsgedächtnisses reduziert.

¹⁸ Das Wort *epistemisch* bezieht sich auf das Wissen und die Erkenntnis.

Wenn man diese Lernstrategie theoretisch sorgfältig einordnet, gehört sie nicht mehr zum Schreiben im Sinne von Hayes und Flower (Abschnitt 4.1). Die erstellten Notizen werden von den Schüler oft nicht mehr überarbeitet, also fällt der Prozess des Revidierens aus. Di Vesta und Gray (1972) weisen deswegen den Notizen eine „Kodierungsfunktion“ (*encoding function*) zu: der Lerninhalt wird als Text kodiert. Die Herstellung dieser externen Repräsentation gehört damit zu einer Randerscheinung des Schreibens. Da man erst durch das Vorwissen weiß, was wichtig ist, schreiben Novizen keine gute Notizen. Eine weitere Schwierigkeit ist, dass die Instruktion zur Anfertigung von Notizen die Aktivierung des Vorwissens nicht explizit fördert.

Nach dieser kurzen Skizze der Vor- und Nachteile von Notizen werfen wir einen Blick auf den Stand der Forschung zum Anfertigen von Notizen. Die bisherigen Studien beziehen sich hauptsächlich auf die „Vorlesungs- und Vortrags-Notizen“, die nicht nachbearbeitet werden können. Die Ergebnisse unterscheiden sich voneinander: Hartley (1983) nimmt einen grundsätzlich positiven Lerneffekt durch das Anfertigen von Notizen an, Kiewra et al. (1991) wiederum findet Hinweise, dass diese Funktion wenig wirksam ist. Auch wenn die Befundlage zweideutig ist, kann eine Reihe von Argumenten gefunden werden, die dafür spricht, das Anfertigen von Notizen als Mittel zu verwenden, um Schüler kognitiv zu aktivieren. Es sind zunächst zwei pragmatische Gründe zu nennen:

- Das Anfertigen von Notizen trägt zur *Schulrelevanz* der Untersuchung bei, weil es eine einfache Maßnahme ist, die jederzeit im Unterricht angewendet werden kann.
- Die gewählte *Stichprobe* besteht aus Novizen (Abschnitt 8.4), die aus weiter oben genannten Gründen kaum Kapazitäten für Revisionsprozesse haben. Deshalb ist für sie das Anfertigen von Notizen eine angemessene Schreibaufgabe.

Notizen, Aufgaben und Fragen könnten die Schüler gleichermaßen kognitiv aktivieren und in das Lernprogramm genauso gut integriert werden. Es sollen hier jedoch **Argumente für den Einsatz der Notizen** geliefert werden:

- Die Anfertigung von Notizen bedeutet eine ausführliche Externalisierung des Wissens bereits während des Lernprozesses. Bei der Bearbeitung des Wissenstests läuft diese Externalisierung dann ein zweites Mal ab. Dies kann zu einem erweiterten Verständnis führen (bessere Transferleistung, Reisberg, 1987).
- Bei einer konkret formulierten Aufgabe sollen die Lernenden die Elemente des Lernstoffs immer im Hinblick auf die Lösung der Aufgabe betrachten. Dies führt zu einer zusätzlichen kognitiven Belastung (Renkl & Atkinson, 2003). Für Novizen ist es aber besser, wenn sie kognitiv weniger belastet sind (Nerdel, 2003, S.230).
- Wenn Lerner gezwungen sind, sich mit einer Aufgabe auseinanderzusetzen, fühlen sie sich oft in ihrer Selbstbestimmung eingeschränkt. Dies ruft eine rationale oder emotionale Ablehnung hervor (Drewniak, 1992). Notizen bieten durch eine freie Aufgabenstellung das Gefühl der *Autonomie* und *Kompetenz* für die Schüler. Die unspezifische Zielvorgabe kann dann zu einem besseren Lernerfolg führen (*Effekt der Zielfreiheit*, Sweller & Levine, 1982).

- In der Studie von Kramer (2005, S.152) zeigte sich in der Transferleistung die Überlegenheit von Notizen im Vergleich zu Mikroaufgaben¹⁹. Dies lässt vermuten, dass in der Notizengruppe „sinnstiftendes Schreiben“ zustande gekommen ist (Abschnitt 4.1). Die Unterschiede in der Behaltensleistung zwischen den Gruppen waren nicht signifikant.
- Wenn man für die Schüler in einem Lernprogramm konkrete Fragen stellt, dann entfalten sie über die Beantwortung der Fragen hinaus keine oder nur wenig weitere kognitive Aktivität (Ökonomieprinzip, Weidenmann, 1988). Bei der Anfertigung von Notizen läuft die Verbindung von einzelnen Informationselementen zu einem Ganzen jedoch eher ab.
- Vertiefende Fragen helfen dem Verständnis von Novizen oft nicht weiter. Fragen zu Bildinhalten verstärken sogar im ungünstigen Fall die Generierung von Fehlvorstellungen. Diese Art der kognitiven Aktivierung hat zwar in der Studie von Sumfleth und Telgenbüscher (2000b, S.72) zu höheren Behaltensleistung geführt, aber keinen Vorteil für die Transferleistung erbracht. Offenbar haben die Schüler den Text durch die Fragen auswendig gelernt. Trotzdem sind sie nicht in der Lage, über die Textbasis hinausgehende Probleme zu lösen.

Anhand der hier genannten Argumente wird deutlich, dass sich die Anfertigung von Notizen bei der Arbeit mit dem Lernprogramm in dieser Untersuchung auf das Lernen positiv auswirkt. Es bleibt aber zu klären, wie **Notizenblätter** schülergerecht gestaltet werden müssen.

Die bisherigen Studien haben einen unterschiedlichen Umgang von Schülern mit leeren oder mit vorstrukturierten Begleitbögen gezeigt (Kramer, 2005, S.153). Es gibt Hinweise, dass sich eine strukturierte Art von Notizen besonders lernförderlich auswirkt (Kiewra et al., 1991). In der vorliegenden Studie werden jedoch halbstrukturierte Blätter eingesetzt, weil die Probanden der 8. Klassenstufe angehören und daher vermutlich nicht mehr auf stark vorstrukturierte Formen angewiesen sind. Damit die Schüler nicht von der hohen Anzahl der Blätter abgeschreckt werden, wurden zum ersten Teil des Lernprogramms vier, zum zweiten Teil drei Notizenblätter eingesetzt (Größe A4, Anhang D.2). Zu jedem Notizenblatt gehören der Sachanalyse entsprechend acht bis zehn Einheiten des Lernprogramms (Abschnitt 7.3). Das bedeutet, dass die Schüler aufgefordert werden, nach jeweils acht bis zehn Einheiten des Lernprogramms eine Zusammenfassung zu schreiben. Bei der Gestaltung der Notizenblätter wurde das Alter der Schüler berücksichtigt, weiterhin wurden die Verbesserungsvorschläge von Boy Kramer (Gespräch am 24.6.2005, IPN Kiel) und die Aussagen einiger Probanden, die an der Vorstudie teilgenommen hatten, eingearbeitet. Aufgrund derer wurde für die Notizen mehr Platz geschaffen. Das größere Platzangebot soll die Schüler stärker zum Zeichnen ermutigen.

Bei der sprachlichen Formulierung der Anweisung wurde auf die Integration der externen Repräsentationen (Text, Bild, Animation) geachtet. Erfolgreiches Lernen im Sinne der vorliegenden Arbeit beinhaltet den Aufbau kohärenter mentaler Modellen aus Text-Bild- bzw. aus Text-Animation-Kombinationen. Die Schüler sollen also zur Nutzung der aufgezählten Kodierungsformen angeregt werden. Die Instruktion der Notizenblätter lenkt daher die Aufmerk-

¹⁹ Mikroaufgaben sind „direkt auf die Software abgestimmte instruktionale Hilfestellungen zur Integration von Text und Bild im Form von konkreten Aufforderungen, wie Fragen oder zu vervollständigenden Sätzen (Kramer 2005, S.77).

samkeit der Schüler sowohl auf die Texte als auch auf die Visualisierungen. Damit erhalten die Schüler die Möglichkeit zur eigenständigen Verbindung der angebotenen Repräsentationen untereinander. Die Instruktionsanweisung ist daher: „Liebe Schülerin, lieber Schüler, ich bitte dich, dass du die Seiten 2-10 im Lernprogramm sehr genau beachtest und kurz zusammenfasst, was dir wichtig erschien. Da ist Platz für deine Notizen und Zeichnungen: “

Zusammenfassung

Da neben der Lernervariable²⁰ und dem Lernmaterial²¹ die Anregung von kognitiven Aktivitäten ein entscheidender Faktor für die Bildwirkungen beim Wissenserwerb ist (Peeck, 1994), wird in die Untersuchung als zweite unabhängige Variable die „Lerneraktivität“ einbezogen (Abschnitt 8.2). Als konkrete Realisierung dessen werden die Lernenden zur Anfertigung von Notizen aufgefordert. Das Erstellen von Notizen sollte zu einer breiteren Vernetzung von Inhalten im Arbeitsgedächtnis führen, weiterhin eine Entlastung des Arbeitsgedächtnisses bewirken. Auch wenn die Lernenden mit dieser Lernstrategie die Inhalte „nur“ wiederholen, sollte diese Untersuchungsgruppe mit einer besseren Behaltensleistung abschneiden. Obwohl durch das Schreiben nicht nur Organisations-, sondern auch Integrationsprozesse angeregt werden können (Abschnitt 4.1), darf man die Erwartungen an die Notizen nicht zu hoch stecken. Die Grundlage für die Anfertigung von Notizen bildet der Text des Lernprogramms. Die Schüler werden nur zum Notieren und nicht zum kreativen Umgang mit dem dargestellten Wissen aufgefordert. Eine Integration des Vorwissens wird mit der Instruktion nicht angestrebt. Deswegen ist eine höhere Transferleistung der Interventionsgruppe gegenüber der Kontrollgruppe nicht realistisch. Dementsprechend beschränkt sich *Hypothese 3* im Abschnitt 8.1 auf eine bessere Behaltensleistung in der Notizengruppe.

20 Einstellung, Interesse, Erleben von persönliche Selbstwirksamkeit und Kompetenz.

21 Vielfältige Kodierungen (das visuelle Angebot verändert sich, es werden immer neue Reize angeboten); Aufmerksamkeitssteuerung.

5 Lernermerkmale

*„Man sieht nur, was man weiß.“
(Heisenberg)*

*„Die Persönlichkeit ist ein Konstrukt, was in der Fachdidaktik nicht existiert.“
(Erich Starauschek)*

Allgemein gilt, dass der Lernprozess von den kognitiven, motivationalen und emotionalen Merkmalen der Lernenden und deren individuellen Ausprägung bestimmt wird (Helmke, 1992b; Kircher et al., 2000). Beim multimedialen Lernen sind drei Hauptkomponenten besonders wichtig (Weidenmann, 1994, S.503), die den Lernerfolg bestimmen:

- die Einstellung zum Medium,
- die kognitiven Fähigkeiten der Lernenden und
- die Verarbeitungstiefe des Lernstoffes.

Um eine tiefere Verarbeitung des Lernangebots zu erzielen, werden in der Untersuchung Notizen eingesetzt (Kapitel 4). Die Verarbeitungstiefe wird nicht weiter ausdifferenziert. Eine für das Lernen entscheidende Variable, das themenspezifische Vorwissen, kurz Vorwissen, wird in diesem Kapitel als erstes thematisiert (Abschnitt 5.1). Den externen Repräsentationsformen entsprechend (Bild, Animation, Text) wird nur eine Auswahl von kognitiven Voraussetzungen berücksichtigt: das räumliche Vorstellungsvermögen (Abschnitt 5.2) und die sprachlichen Fähigkeiten (Abschnitt 5.3). Die Einstellung zum Medium wird in der vorliegenden Untersuchung mit zwei Fragen erfasst, die die Akzeptanz des Lernprogramms messen (Abschnitt 9.2). Als Ergänzung dazu wird das Erleben von persönlicher Selbstwirksamkeit und Kompetenz in der Physik aufgenommen (Abschnitt 8.3.2). Die erwähnten Lernermerkmale beeinflussen die Ergebnisse der Untersuchung, daher spielen sie als Moderatorvariablen²² bei der Absicherung und Interpretation der Ergebnisse eine wichtige Rolle (Kapitel 9, 10).

5.1 Themenspezifisches Vorwissen

„Wenn ich die gesamte Pädagogische Psychologie auf nur ein einziges Prinzip zu reduzieren hätte, würde ich folgendes sagen: Der wichtigste Einzelfaktor, der das Lernen beeinflusst, ist das, was der Lernende bereits weiß. Ermittle dies und unterrichte ihn entsprechend.“ (Ausubel, 1978, zitiert nach Mietzel, 2006, S.191). Wie dieses Zitat verdeutlicht, ist das (domänen-spezifische) Vorwissen eine entscheidende Variable für den Wissenserwerb. Das Vorwissen der Lernenden wird im Lernprozess durch Assoziationen aktiviert. Ob es dann den Lernpro-

²² Eine Moderatorvariable bezeichnet in der Statistik eine Variable C (z.B. kognitive Voraussetzungen der Lernenden), von der abhängt, wie der Effekt einer Variable A (Lehrmethode) auf eine andere Variable B (Wissenserwerb der Schüler) ausfällt.

zess positiv beeinflusst, lässt sich anhand des dargelegten theoretischen Modells erklären (Abschnitt 1.2):

- Dass Lernende über Vorwissen in einer Domäne verfügen, heißt, dass sie auch ein entsprechendes mentales Modell vorher entwickelt haben. Sie können dann auf diesem bestehenden mentalen Modell aufbauen und die neue Information darin integrieren.
- Der Aufmerksamkeitsfokus wird durch das Vorwissen differenzierter, so können sie wichtige Inhalte von unwichtigen leichter unterscheiden. Dies reduziert ihre intrinsische kognitive Belastung.
- Lernende mit hohem Vorwissen besitzen schon die Fertigkeiten und Lernstrategien zum Aufbau mentaler Modelle und können dies auf den Erwerb neuen Wissens anwenden (Peeck, 1994, S.77).

Wenn die Lernenden kein Vorwissen haben, dann müssen sie eine neue mentale Wissensstruktur entwickeln, was zusätzliche mentale Kapazitäten von diesen Anfänger benötigt. Das Matthäusprinzip wirkt auch an dieser Stelle: „Wer hat, dem wird gegeben“, d.h. der Lernende mit höherem Vorwissen lernt mehr von dem dargestellten Material, schneidet dadurch im Wissenstest besser ab, als Schüler mit niedrigem Vorwissen (**Vorwissenseffekt**). Die Bedeutung der Intelligenz nimmt mit zunehmender Expertise bzw. zunehmendem Vorwissen ab (Köller & Baumert, 2002). Hier sollen zunächst theoretische Überlegungen zum Lernen mit Multimedia zusammengefasst werden, die den Einfluss des Vorwissens betreffen:

Experten können, wie oben schon erwähnt, auf bereits bestehende, im Langzeitgedächtnis vorhandene (dynamische) mentale Modelle zurückgreifen und lenken dadurch ihre Aufmerksamkeit auf thematisch relevante Information. Ihr hohes Vorwissen kann mentale Modellkonstruktion auch ohne Bild- bzw. Animationsunterstützung erlauben (Schnotz, 2003, Folie 21f). In bestimmten Lernumgebungen können wiederum Experten auch benachteiligt sein, was unter „Expertise-Reversal-Effekt“ bekannt ist: Das Verarbeiten von gezeigten Visualisationen beansprucht dann unnötig Zeit und behindert dadurch die Informationsverarbeitung. Weiterhin können die präsentierten Lerninhalte mit den bestehenden mentalen Modellen kollidieren und redundante Informationen müssen identifiziert, verknüpft bzw. reduziert werden. Dies kann zu einer zusätzlichen kognitiven Belastung des Arbeitsgedächtnisses führen, was eine reduzierte Lernleistung zur Folge hat. Die vorgelegten Visualisierungen sind in diesem Fall nicht nur wirkungslos, sondern stören sogar die individuelle Bildung eines mentalen Modells (Mayer & Gallini, 1990; Kalyuga et al., 2003).

Novizen können wiederum kein bestehendes mentales Modell im Arbeitsgedächtnis aktivieren, das die Informationsverarbeitung erleichtern würde. Novizen benötigen also die Bilder bzw. Animationen als Vorlage für ihren mentalen Modellaufbau. Andererseits reichen ihre internen Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses nicht immer aus, um die große Zahl neuer Informationen miteinander in Verbindung zu setzen. Die Nutzung mehrerer Kodierungsformen (*extraneous cognitive load*) und gleichzeitige Komplexität des Lerninhalts (*intrinsic cognitive load*) können sie kognitiv überfordern (Lowe, 1999). Sie greifen dann auf inadäquate Verar-

beitungsstrategien zurück, die dann eine „negative perzeptuelle Dominanz“ und/oder „Fehlvorstellungen“ zur Folge haben (Abschnitt 3.2). Diese Zusammenhänge mögen zunächst ernüchternd wirken, weil man eigentlich in den meisten Fällen gerade Novizen Lerngelegenheiten bieten will. An dieser Stelle sollen deshalb Ergebnisse zu lernprogrammspezifischen Text-Bild- und Text-Animation-Kombinationen herangezogen werden. Generell gilt, dass die Ergebnisse an manchen Stellen uneinheitlich sind, jedoch lassen sich allgemeine Tendenzen erkennen.

Ergebnisse zu **Text-Bild-** und **Text-Animation-Kombinationen**

- Sumfleth und Telgenbüscher (2000b, S.72, 75) haben signifikant bessere Behaltens- und Transferleistungen der Experten im Vergleich zu Novizen gefunden; der Vorwissenseffekt wurde in ihrer Studie erneut bestätigt. Die bildliche Darstellung der Inhalte hatte bei den Experten keinen Einfluss auf die Lernleistung, Novizen mit „step&parts“-Bilder erreichten wiederum bessere Behaltens- und Transferleistung als Novizen mit Schulbuchbildern. Die Gestaltung von Bildern beeinflusst also die Lernleistung von Novizen.
- Lernende mit keinem oder nur geringem Vorwissen profitieren kaum von Bildern, da sie nicht in der Lage sind die dargebotene relevante Information zu erkennen und zum Aufbau mentaler Modelle zu nutzen (Joseph & Dwyer, 1984; Mayer & Gallini, 1990). Lernende mit niedrigem und mittlerem Vorwissen können am meisten von Bildern profitieren. Hier dienen die Visualisierungen als Vorbild für die Entwicklung von mentalen Modellen. Lernende mit hohem Vorwissen wiederum bilden auch ohne Bilder adäquate mentale Modelle oder adaptieren ihr altes mentales Modell (Mayer & Gallini, 1990).
- Bilder und Animationen haben in der Studie von Lewalter (1997a, S.168ff) die Vorwissensdefizite kompensiert: Der bei der Textversion der Lernumgebung gemessene Vorwissenseffekt wurde mit der Integration von Visualisierungen deutlich gemildert. Schnotz und Banert (1999, S.231f) bestätigten auch die positive Wirkung von Bildern in Texten für Lernende mit geringem Vorwissen. Nach ihrer Meinung sind Lernende mit eher geringeren Lernvoraussetzungen auf Bildunterstützung angewiesen.

Lowe (1993) schildert die Unterschiede in der Qualität mentaler Repräsentationen zwischen Novizen und Experten: Novizen orientieren sich bei der Entwicklung eines mentalen Modells eher an visuell-räumlichen Informationen, während Experten in der Lage sind, eine stabilere, stärker sprachgebundene mentale Repräsentation (z.B. Fachterminologie) aufzubauen.

- Sumfleth und Hollstein (Bild vs. Animation vs. selbstkonstruierte Simulation, 2005, S.355f) bestätigten in ihren Untersuchung einen Effekt des Vorwissens; den größten Wissenszuwachs erzielten sie jedoch in jeder Treatmentgruppe²³ bei Schülern mit niedrigem Vorwissen. Mangelhaftes Vorwissen führte in dieser Studie nicht zwangsläufig zu einer inadäqua-

²³ Treatmentgruppe bedeutet die Untersuchungsgruppe von Schülern, in der die Lehrmethode zum Einsatz kommt. Eine weitere Möglichkeit zur Formulierung: die Lerngruppe mit der Treatmentvariable „Animation“.

ten Nutzung von Abbildungen, wie das Joseph und Dwyer (1984), sowie Mayer und Gallini (1990) behauptet haben.

- Es wird allgemein von Animationen erwartet, dass besonders Lernende mit niedrigem Vorwissen von diesen profitieren (Dean & Enemoh, 1983; Mayer, 1997). Bei Höffler (2007, S.108) konnte dies auch gezeigt werden: Animationen waren für Novizen lernförderlicher als vier Standbilder. Bei Experten zeigten sich in der gleichen Untersuchung keine Unterschiede.

Insgesamt ist erkennbar, dass Visualisierungen eine unterstützende Wirkung auf das Lernen von Novizen haben. Bei Lernenden mit hohem Vorwissen sind sie eher überflüssig. Die dargestellten Ergebnissen geben jedoch keine klare Antwort darauf, ob Novizen eher mit Bildern oder mit Animationen unterstützt werden können. Da aber die Studien einen starken Einfluss des Vorwissens auf die Lernleistung zeigen, wird die moderierende Wirkung des Vorwissens in der vorliegenden Untersuchung berücksichtigt (Abschnitt 9.3-9.7).

Ergebnisse zu **Notizen**

- Bei Bergeler und Pospiech (2008, S.321) traten zwar keine signifikante Unterschiede zwischen Treatment- und Kontrollgruppe (Schreibaufgaben vs. keine Schreibaufgaben) im Vorwissen auf. Schüler mit geringem Vorwissen in der Treatmentgruppe „Schreiben“ konnten physikalische Sachverhalte jedoch besser verbalisieren und anwenden als Schüler der Kontrollgruppe gleichen Vorwissensniveaus. Indirekt zeigt sich also ein positiver Effekt des Schreibens im Physikunterricht.
- Kramers Ergebnisse (2005, S.130f, 158f) hinsichtlich des Lernens mit Notizen bestätigten einen Vorwissenseffekt in der Behaltensleistung: mehr Vorwissen ging hier mit mehr Behaltensleistung einher. Er interpretierte es so, dass die Schüler ihr bestehendes Vorwissen produktiv in den Lernprozess einbringen konnten. In der Transferleistung haben Lernende mit mittlerem Vorwissen von den Notizen profitiert.

Da sich das Notieren auf die Transferleistung von Probanden kaum auswirken kann (Abschnitt 4.2), bleibt diese Dimension der Lernleistung ausgeklammert, d.h. es sind keine Unterschiede zwischen Treatment- und Kontrollgruppe zu erwarten. In Bezug auf die Behaltensleistung ist anzunehmen, dass Lernende mit unterschiedlichem Vorwissen in unterschiedlichem Maße von Notizen profitieren. Auf Grund der Ergebnisse Kramers ist hier ein Vorwissenseffekt zu erwarten. Für weitere Effekte kann man im Rahmen der Cognitive-Load-Theorie (Abschnitt 1.3) Vorhersagen treffen:

- Schüler mit niedrigem Vorwissen erfahren eine höhere intrinsische kognitive Belastung durch den Lerngegenstand, da sie keine oder nur wenige mentale Repräsentationen zu dem Lernstoff besitzen. Die Anfertigung von Notizen benötigt zwar weitere kognitive Ressourcen, ist aber hilfreich als Wiederholungsstrategie. Daher ist in der Behaltensleistung eine Verbesserung zu erwarten.

- Schüler mit höherem Vorwissen sind durch das Lernprogramm kognitiv weniger ausgelastet. Sie können zwar die Notizen problemlos anfertigen, benötigen aber diese Hilfestellung eigentlich nicht. Unterschiede in der Behaltensleistung sind zwischen den Gruppen „Notizen“ vs. „keine Notizen“ deshalb nicht zu erwarten.

5.2 Räumliches Vorstellungsvermögen

Räumliches Vorstellungsvermögen bedeutet sowohl die Generierung von visuellen Vorstellungen aufgrund von Bild-, Animations- und Textinformation, als auch die Durchführung mentaler Operationen mit diesen visuellen Vorstellungen. Brünken et al. (2000, S.38) bezieht sich in seiner Definition des räumlichen Vorstellungsvermögens auf diesen zweiten Aspekt: Es wird definiert als die Fähigkeit, „Objekte in zwei oder drei Dimensionen mental rotieren oder falten und sich die Lage- oder Formveränderungen derart manipulierter Objekte vorstellen zu können“. Nach einer Analyse von (Carroll, 1993) können fünf verschiedene Faktoren identifiziert werden, aus denen sich diese Fähigkeit zusammensetzt. An dieser Stelle sollen nur zwei dieser Faktoren beschrieben werden, die eine höhere kognitive Herausforderung darstellen, wie es beim Lernen mit Animationen der Fall ist (Höffler, 2007, S.108). Des Weiteren werden diese zwei Komponenten unter räumlichem Vorstellungsvermögen (abgekürzt RV) verstanden:

- *Spatial Visualisation* beinhaltet das Verstehen, Kodieren und Transformieren von räumlichen Formen (Carroll, 1993, S.309).
- *Spatial Relation* umfasst die Transformation, zumeist Rotation von 2D-Objekten in einem einzelnen Schritt in möglichst kurzer Zeit (Miyake et al., 2001).

In der Studie von Kosslyn und Pomerantz (1992) zeigte sich, dass visuelle Vorstellungen und die mentalen Operationen, die mit ihnen durchgeführt werden können, gewisse Ähnlichkeiten mit der Wahrnehmung realer Gegenstände aufweisen. Daher kann man annehmen, dass RV in einem Lernprozess entwickelt wird, in dem sich **der konkrete Umgang mit den Objekten** der Wirklichkeit (z.B. technischem Spielzeug) unterstützend auswirkt (Abschnitt 2.2). Eine Untersuchung in der Chemiedidaktik (Barke, 1980) zeigte die **Altersabhängigkeit** eines entwickelten RV: Erst Schüler ab 8. und 9. Klasse waren so weit fortgeschritten, dass abstrakte zweidimensionale Zeichnungen räumlicher Strukturen (Molekülmodelle von Stoffen) richtig interpretiert wurden. Weitere Ergebnisse bezüglich der Höhe der RV-Leistungen liegen auch durch Barke und Sopandi (2006; N = 548, 9-12. Klassen, Gymnasium) vor: Sowohl bei Mädchen als auch bei Jungen korrelierte das RV signifikant mit dem Chemieverständnis. Es lässt sich so erklären, dass das Verständnis für chemische Sachverhalte von den Schülern Modellvorstellungen erfordert, die wiederum erst ab einem Mindestmaß an RV entwickelt werden können. Es konnte weiterhin eine signifikante Korrelation zwischen RV und Zensuren der naturwissenschaftlichen Fächer gezeigt werden. Da ein hohes RV auch das Verstehen und Kodieren von räumlichen Formen (*Spatial Visualisation*) beinhaltet, werden das Memorieren und die Anwendung einfacher Algorithmen von dieser kognitiven Fähigkeit positiv beeinflusst.

Aufgrund dessen wird in der vorliegenden Arbeit angenommen, dass ein hohes RV eine positive Auswirkung auf die **Behaltens- und Transferleistung** hat (*Hypothese 5.1*, Abschnitt 8.1).

Vorhersagen zum Lernen mit Bildern und Animationen können anhand der Supplantations-
theorie von Salomon (1979) getroffen werden: Da durch die kompensatorischen Wirkungen
der Animationen eine fehlende Fähigkeit der Schüler (hier niedriges RV) ersetzt werden kann,
wird angenommen, dass Schüler mit niedrigem RV vom Lernen mit Animationen eher profi-
tieren als vom Lernen mit Bildern. Hohes RV kann wiederum Mängel im instruktionalen De-
sign (z.B. Standbilder anstelle einer Animation) ausgleichen. Dies konnte in der Studie vom
Höffler (2007, S.138f) mehrfach gezeigt werden und bildet dadurch ein empirisches Argu-
ment für die Hypothesenbildung der vorliegenden Arbeit (*Hypothesen 5.2, 5.3*).

Räumliches Vorstellungsvermögen spielt bei der Anfertigung von Notizen als Lernermerkmal
keine große Rolle. An dieser Stelle sei nur anzumerken, dass Lernende mit geringen RV eher
zum Schreiben von Notizen als zur Anfertigung von Bilder neigen (Seufert & Brünken,
2005). Da das räumliche Vorstellungsvermögen die kognitive Verarbeitung und das Verständ-
nis von visuellen Information beeinflusst, wird sein moderierender Einfluss auf das Lerner-
ergebnis von Probanden kontrolliert (Abschnitt 8.3.3) und in die Auswertung einbezogen (Ab-
schnitt 9.5.2, 9.7.2).

5.3 Sprachliche Fähigkeiten

Da die sprachlichen Fähigkeiten eine einflussreiche Rolle bei den kognitiven Verarbeitungs-
prozessen spielen, hängt von ihnen im Lernprozess nicht nur das Textverstehen, sondern auch
die Anfertigung von Texten ab (vgl. Kintsch, 1998, S.282). In der naturwissenschaftlichen
Fachdidaktik liegen jedoch keine Ergebnisse darüber vor, welchen Einfluss die sprachlichen
Fähigkeiten der Schüler auf das Lernen durch Schreiben haben können. Eine signifikante Kor-
relation zwischen den verbalen Fähigkeiten und der Lernleistung konnte in der Studie von
Bergeler (2009, S.131) festgestellt werden. Das Ergebnis betrifft jedoch die gesamte Stichpro-
be und lässt daher keine spezifische Aussage über die Auswirkungen der Schreibmethode zu.
Da die sprachlichen Fähigkeiten auch ein Indikator für Intelligenz darstellen, ist dieses Ergeb-
nis nachvollziehbar. Daher wird in der vorliegenden Untersuchung erwartet, dass Schüler mit
hohen sprachlichen Fähigkeiten eine bessere Lernleistung als Schüler mit niedrigen sprachli-
chen Fähigkeiten erzielen (*Hypothese 6.1*).

In Bezug auf die Frage „Unterstützt das Schreiben Schüler mit niedrigen sprachlichen Fähig-
keiten im Lernprozess?“ können die folgenden Vermutungen gemacht werden:

- Generell gilt, dass mündliche und schriftliche Sprache sich auch im naturwissenschaftlichen
Unterricht grundsätzlich unterscheiden (Tajmel, 2009a, S.2f). Für Schriftsprache braucht
man metasprachliche Kompetenzen, also das Nachdenken *über* Sprache (z.B. Orthographie,
Interpunktion, Satzbau, Konjugation, „zeitloses Präsens“ usw.). Die Verschriftlichung eines
Textes erfordert infolgedessen eine zusätzliche mentale Kapazität vom Verfasser als die
mündliche Sprache. Diese zusätzliche kognitive Belastung kann Schüler mit niedrigen

sprachlichen Fähigkeiten (SF-) überfordern, weshalb sie durch das Schreiben von Notizen schlechter abschneiden würden als ihre Mitschüler mit gleich geringen Sprachfähigkeiten, jedoch ohne diese Schreibmethode (vgl. Nieswandt, 1997, S.332): $SF_{N-} < SF_{kN-}$, wobei N für „Notizen“ und kN für „keine Notizen“ steht.

- Die Anfertigung von Notizen unterstützt die Schüler in ihrer Wissenskonstruktion, da die Inhalte erst durch das Nachdenken in eine lineare Schrift gebracht werden können. Deshalb kann man erhoffen, dass durch erneutes Nachdenken über den Lerntext die Inhalte bei den Schülern besser fixiert werden. Durch die Anfertigung von Notizen wird ferner ein externer Wissensspeicher bereitgestellt, was die Belastung des Arbeitsgedächtnisses reduzieren kann (Abschnitt 4.2). Deshalb könnte diese Schreibmethode gerade für Schüler mit niedrigen sprachlichen Fähigkeiten hilfreich sein und ein besseres Erinnern des Lerninhalts zur Folge haben (vgl. Durst & Newell, 1989): $SF_{N-} > SF_{kN-}$.

Anhand dieser widersprüchlichen Argumente kann nur eine zweiseitige Hypothese aufgestellt werden. Es wird ein Unterschied zwischen den Schülern niedriger sprachlichen Fähigkeiten (SF-) angenommen, die mit Notizen bzw. ohne Notizen lernen (*Hypothese 6.2*). Die Richtung des Unterschieds ist jedoch unbestimmt ($SF_{N-} \neq SF_{kN-}$).

Als Messinstrument für die sprachlichen Fähigkeiten wird der allgemeine Wortschatz der Schüler erhoben (Abschnitt 8.3.3). Der Wortschatz ist zwar nur ein Teilaspekt der sprachlichen Fähigkeiten, er ermöglicht jedoch das Textverständnis. Der Zusammenhang zwischen diesem Sprachverständnis und dem Lernerfolg durch Notieren ist naheliegend. Die Ergebnisse zu der vermuteten Abhängigkeit zwischen dem Lernerfolg, der Instruktion „Notizen“ und den sprachlichen Fähigkeiten werden im Abschnitt 9.7.3 dargestellt.

6 Die Lehre vom Licht

„So also ist das Licht: An sich selber ist es nicht zu sehen, nur an den Dingen; und auch die Dinge sind nicht aus sich selber zu sehen, sondern nur im Licht.“
(Martin Wagenschein)

6.1 Modellwahl

Es ist wahrscheinlich, dass Animationen in bestimmten Wissensdomänen nützlicher sind als in anderen. Dies zu überprüfen würde jedoch den Rahmen dieser Dissertation sprengen. Intuitiv nahe liegend war, dass Inhalte als Untersuchungsgegenstand ausgewählt werden, wo dynamische Visualisierungen zum Verständnis der Phänomene deutlich beitragen können. Die indirekte Erscheinung des Lichtes macht seine Visualisierung in den Lernmedien nötig: es werden Bilder eingesetzt. Seiner dynamischen Natur entsprechen wiederum Animationen. So fiel die Wahl auf die **Visualisierung des Lichtes** als Untersuchungsgegenstand.

Die Lichtausbreitung gehört zu den zentralen Themenfeldern der Jahrgangsstufen 5/6 im Land Brandenburg (Rahmenlehrplan für die Grundschule²⁴, 2004, S.29). Die dynamische Visualisierung der Lichtausbreitung liegt daher nicht nur in unserem Forschungsinteresse, sondern begründet auch den zukünftigen Einsatz des Lernprogramms im Physikunterricht.

Da das Licht zu seiner Ausbreitung Zeit benötigt, ist die Lichtausbreitung ein Geschehen in der Zeit, also ein Prozess. Für Schüler ist es jedoch schwierig, diese physikalische Vorstellung der Lichtausbreitung zu gewinnen. Oftmals wird das Licht (Guesne, 1984, S.82):

„(1) gleichgesetzt mit seiner Quelle, mit seinen Wirkungen oder mit einem Zustand; (2) als besonderer Gegenstand anerkannt, der im Raum zwischen seiner Quelle und den Wirkungen lokalisiert ist, die es erzeugt.“

Bei Galili (1996, S.853) entspricht dies der naiven Vorstellung vom „*Static light model*“²⁵. Die Darstellung selbst und diese Alltagsvorstellungen der Schüler verführen dazu, die Lichtstrahlen bzw. Lichtbündel und damit auch das Licht der Kategorie der Objekte zuzuordnen (Guesne, 1984, S.81; Galili, 1996, S.853; Galili & Hazan, 2000, S.63). Nur wenige Schüler vollziehen durch den Physikunterricht den erwünschten Kategorienwechsel (Jung, 1981, S.149; Chi et al., 1994b; Wiesner, 1995, S.137). Die fehlende physikalische Vorstellung von der Lichtausbreitung behindert die Entwicklung einer physikalischen Vorstellung des Sehens, die ebenfalls selten bei Schüler zu finden ist (Abschnitt 6.2). An dieser Stelle scheint der **Einsatz von Animationen** begründet zu sein, da animierte Bilder den Aufbau von dynamischen mentalen Modellen unterstützen können (Abschnitt 3.2). Die Ausbreitung des Lichtes als

²⁴ Download: <http://bildungsserver.berlin-brandenburg.de> (Stand: 7/2009)

²⁵ Licht wird als Entität gedacht, welche im Raum um einer Quelle herum lokalisiert ist (siehe auch Abschnitt 6.2, Abbildung 6-7a).

fachdidaktisches Ziel des Lernprogramms wird hauptsächlich visuell und durchgängig vermittelt (Abschnitt 7.4.2).

Die Frage ist: Welches **Modell des Lichtes** soll verwendet werden? Da in der Fachdidaktik neben dem phänomenologischen Ansatz auch unterschiedliche Modelle des Lichtes diskutiert werden, soll an dieser Stelle die fachdidaktische Positionierung des Lernprogramms ergründet werden. Das Licht wird in der Schule mit ikonischen Modellen erklärt (Bleichroth et al, 1991, S.76). Die ikonischen Modelle sind Erzeugnisse des menschlichen Geistes, Vorstellungen von etwas Realem aber sonst Unanschaulichem. Sie unterscheiden sich auch je nach Grad des Realitätsbezuges.



Abbildung 6-1: Sonnenstrahlen (Lochkamera-Foto von Stefan Silies).

Das Strahlenmodell des Lichtes ist durch die *Idealisierung der Realität* entstanden (Abbildung 6-1). Das Wellenmodell und das Teilchenmodell des Lichtes gehören zur zweiten Art der ikonischen Modellen: sie *existieren nur in der Vorstellung*. Bei der Modellwahl für die Untersuchung wurde als oberstes Prinzip ein für die Schüler optimaler Grad des Realitätsbezuges gewählt. Die Bildentstehung mit einer Lochkamera bzw. Linse wird zum Hauptthema des Lernprogramms. Da die Probanden der Untersuchung erst Schüler der 8. Klasse sind (Abschnitt 8.4), ist das Lernprogramm von einem **phänomenologischen Ansatz** geprägt. Die Lerninhalte sind in der Erfahrungswelt angesiedelt. Dies steht auch im Einklang mit der weiterführenden Idee des Lernprogramms: Die Inhalte werden anhand von Text und Bild bzw. Animation erklärt; sie sind aber so konzipiert, dass sie den Boden für die zukünftige Verbindung des Lernprogramms mit Schülerexperimenten vorbereiten (Abschnitt 7.1, „Baukastenprinzip“). Erst nach dieser phänomenologischen Beschreibung soll die physikalische Erklärung mit einem geeigneten Modell des Lichtes weitergeführt werden. Es empfiehlt sich, ein **Modell mit stärkerem Realitätsbezug** zu wählen. Es kommen die folgenden beiden Modelle des Lichtes in die Frage, wobei deren visuelle Gestaltung auch in Betracht genommen wird:

Lichtbündel

Lichtbündel sind realitätsnah und folgen aus dem phänomenologischen Ansatz der Optik: Eine Glühlampe²⁶ – abgesehen von der Stelle, wo die Fassung ist – sendet Licht in alle Richtungen aus. Wenn man vor dieser Lampe eine Blende stellt, entsteht ein „Lichtkegel“ (Abbildung 6-2), den man durch Streupartikel sehen bzw. sichtbar machen kann. Dieses Licht, das sich nicht in alle Richtungen ausbreitet und das ein bestimmtes Raumgebiet einnimmt, nennen wir Lichtbündel.

Die Lichtquelle wird im nächsten Schritt in eine Vielzahl von diskreten Flächenelementen, in sogenannte *Punktlichtquellen* zerlegt. Ein Lichtbündel kann sich dann aus einer Punktlichtquelle ausbreiten. Diese Abstraktion unterscheidet das Lichtbündel als Modell von den beobachtbaren Lichtkegeln (Herdt, 1990, S.90; Muckenfuß, 1996, S.15f).

Lichtbündel dürfen, um auf den Bildern sichtbar zu sein, eine Farbe haben. Diese Farbe ist ein Reizzustand, der in den Augen durch Licht einer bestimmten Energie hervorgerufen werden kann. Lichtbündel werden in Lehrbücher aus unbekanntem Gründen am häufigsten mit gelber Farbe gezeichnet (z.B. Grehn & Krause, 1998, S.296ff). Fotografien zeigen die Lichtbündel in vielfältigen Farben (z.B. Tipler, 1994, S.1036). Da die Lichtbündel unendlich sind, werden sie bis zum Rand des Bildes gezeichnet.



Abbildung 6-2: Lichtbündel
(Skizze der Autorin).

Lichtstrahl

Der Lichtstrahl ist ein geometrisches Modell des Lichtes, weil es sich experimentell nicht erzeugen lässt. Wenn man nämlich das Lichtbündel an einen Lichtstrahl annähern möchte, schickt man das Lichtbündel durch ein enges Loch. Dann wird in diesem Experiment anstatt eines Lichtstrahls eine Beugungserscheinung auftreten. Deswegen ist „Lichtstrahl“ zwar an manchen Stellen ein nützliches, aber in seiner Anwendung auch begrenztes geometrisches Modell.

Der Lichtstrahl breitet sich von einer Punktlichtquelle geradlinig aus bis zum Unendlichen, ohne sich zu verbreitern. Er ist also eine Halbgerade, dementsprechend eindimensional: Ein Lichtstrahl hat kein Durchmesser, ist ausdehnungslos und damit unsichtbar (Muckenfuß, 1996, S.16). Insofern hat er auch keine Farbe. Lichtstrahlen werden in Lehrbücher mit einer neutralen Farbe – je nach Hintergrund weiß oder schwarz – gezeichnet (Abbildung 6-3).

Die Gefahr bei dem Strahlenmodell des Lichtes kann darin bestehen, dass die Schüler die Bildentstehung bei der Linse nur noch mit der geometrischen Konstruktion verbinden und den eigentlichen Grund, die Lichtbrechung an der Linse vergessen (Hacker, 2003, S.1). Weiterhin können Lichtstrahlen in Experimenten nicht beobachtet werden, was dem Anspruch eines



Abbildung 6-3:
Lichtstrahlen (Skizze
der Autorin).

²⁶ Die EU-Lampen-Verordnung verbietet die Herstellung und den Vertrieb von Glühlampen geringerer Energieeffizienzklassen. Da aber bis September 2016 Lampen mit der Energieeffizienzklasse C erlaubt sind, wird die Glühlampe noch in den nächsten Jahren zum Erfahrungsschatz der Kinder gehören dürfen.

starken Realitätsbezuges nicht entspricht. Aus diesen Gründen habe ich mich in der vorliegenden Arbeit für die „**Bündeloptik**“ entschieden: die Inhalte des Lernprogramms werden mit Lichtbündeln dargestellt. Auf das geometrische Modell „Lichtstrahl“ sowie auf die Konstruktion des Bildes mithilfe ausgezeichneter Strahlen wird also verzichtet.

Für die Schüler wird mit einer anderen Begründung expliziert, warum der Begriff „Lichtstrahl“ nicht benützt wird: „weil es in der Alltagssprache zu viele Bedeutungen hat“ (I/S.26)²⁷. Damit möchten wir Assoziationen an Sonnenstrahlen, strahlende Gesichter, radioaktive Strahlung, etc. vermeiden.

Dünne Lichtbündel

Zur physikalischen Erklärung der optischen Abbildung werden *dünne Lichtbündel* verwendet. Damit wird die Konsistenz des Bündelmodells durch das ganze Lernprogramm gewährleistet. Das dünne Lichtbündel ist eigentlich ein Hybridmodell²⁸ (Vosniadou, 2001; Widodo & Duit, 2005, S.132) zwischen Lichtstrahl und Lichtbündel. Wir zeigen an dieser Stelle ausgewählte Bündel, die es so nicht gibt (Abbildung 6-4). Ihr Vorteil ist, dass ihre Entstehung durch die Blende und den Laserpointer experimentell überprüft werden kann (I/S.17ff). Um dem Phänomen gerecht zu werden, werden die Lernenden darauf aufmerksam gemacht, dass die

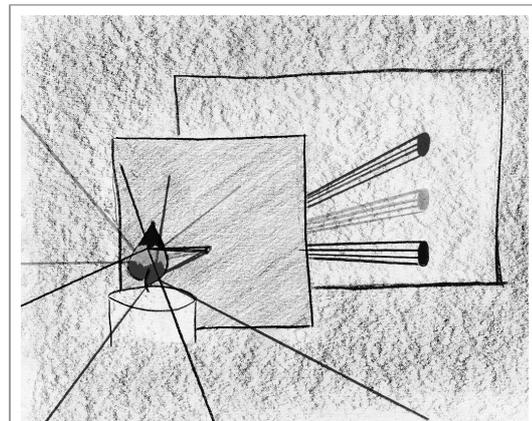


Abbildung 6-4: Optische Abbildung mit der Lochkamera (I/S.34).

mit Blenden erzeugten dünnen Lichtbündel eigentlich auch „trichterförmig auseinanderlaufen“ (I/S.18). Damit sprechen wir die Divergenz dieser Lichtbündel an. Aus diesem Grund werden die Lichtbündel im Lernprogramm unter folgenden Annahmen verwendet, dass sie

- innerhalb der Länge eines Meters betrachtet werden, was für die Schüler eine bekannte Länge ist,
- durch eine kleine Blendenöffnung entstehen.

Diese Näherung ermöglicht, die Divergenz zu vernachlässigen. Die, durch einen Laser oder durch kleine Blendenöffnungen erzeugten Lichtbündel verlaufen dann *nahezu parallel*²⁹, was für Anfänger in der Regel didaktisch hinreichend ist. Mit dünnen Lichtbündeln wird also versucht unnötige Abstraktion (Lichtstrahl-Modell) zu vermeiden und gleichzeitig nahe an den Phänomenen zu bleiben. Ein weiterer Vorteil der dünnen Lichtbündel gegenüber Lichtstrahlen in den Abbildungen ist, dass sie eine Farbe haben dürfen, was die Erklärung der Bildentstehung mit einer Lochkamera erleichtert (Abbildung 6-4).

27 Der erste Teil des Lernprogramms wird im Weiteren mit der römischen Ziffer I gekennzeichnet, dementsprechend der zweite Teil mit II. Die Seitenzahlen beziehen sich auf die Seiten des Lernprogramms (Anhang A.1 und A.2).

28 Hybridmodelle bedeuten eine Vermischung oder Kombination der physikalischen Modellen und Alltagsvorstellungen.

29 Parallele Lichtbündel erzeugt man mit einer punktförmigen Lichtquelle und bikonvexen Linsen.

Flüssigkeitsmodell des Lichtes

Die Erkenntnis, dass das Licht zu seiner Ausbreitung Zeit benötigt, gehört nicht zum konkreten Erfahrungsbereich der Schüler. Es ist auch aus dem gezeigten Lochkamera-Experiment nicht ableitbar. Das ist ein abstraktes Wissen, was man sehr gut mit Animationen visualisieren kann. An diesem Punkt wird der phänomenologische Ansatz verlassen. Die Frage ist nur, welches physikalische Modell das beschreiben kann?

Im Flüssigkeitsmodell des Lichtes geht man von dem mentalen Modell der homogenen, sich nicht verdünnenden und mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitenden „Flüssigkeit“ aus. Die Flüssigkeitsanalogie des Lichtes dient der Veranschaulichung. Die „Flüssigkeit“ entstammt der Lebenswelt der Schüler und ist diesen vertraut. Dieser bildhafte Vergleich ist eine sinnvolle Lernhilfe, weil es durch seine einleuchtende Darstellung eine minimale Zeit beansprucht (Kircher et al., 2000, S.120f; Wiesner, 1986, S.25). Das Licht wird als strömende Substanz mit gelben Kreisflächen dargestellt (Abbildung 6-5). Die Kreise zeigen Zeitpunkte an und zusammen mit den Richtungspfeilen visualisieren sie die Allseitigkeit der Lichtausbreitung.



Aus der Sicht der Fachdidaktik stellt die Vorstellung „Licht als strömende Substanz“ einen nützlichen Lernschritt dar, weil sie empirisch für die Aneignung des physikalischen Sehvorgangs als hilfreich erwiesen hat (Herdt, 1990, S.89f, 410f). Die dynamische Visualisierung ermöglicht eine noch genauere Darstellung des Vorgangs: Es wird gezeigt, dass das Licht sich von seiner Quelle, von der Glühlampe löst und „selbständig wegläuft“. Diesen Ansatz finden wir auch in dem Karlsruher Physikkurs in Verbindung mit einem Draht, der eine elektromagnetische Welle erzeugt: „Schaltet man einen elektrischen Strom in einem Draht ein oder aus, so löst sich vom Draht eine elektromagnetische Welle.“ (Herrmann, 1995c, S.42). Dieses Zitat beschreibt nur einen einmaligen Vorgang, eine Art elektromagnetischer Puls. Wenn man aber eine Glühbirne einschaltet und sich dabei der Draht zur Weißglut erhitzt, löst sich vom Draht ständig eine elektromagnetische Welle. In dem Lernprogramm handelt es sich um diesen kontinuierlichen Vorgang. Das ist eindeutig Physik aus der Endzeit des 19. Jahrhunderts. Dem heutigen Wissensstand entsprechend werden von einem glühenden Draht Photonen und keine elektromagnetischen Wellen abgestrahlt. Die elektromagnetische Wellentheorie des Lichtes gilt seit Einsteins Erklärung des photoelektrischen Effekts als widerlegt. Es ist also kein Wunder, dass manchen Experten der Physikunterricht als eine „Museumsführung“ vorkommt. Die Schule gibt jedoch nicht nur das aktuelle Wissen weiter, sondern auch Kulturgeschichte. Hin-

zu kommt, dass Phänomene wie Beugung und Interferenz mit dem Teilchenstrahl schwer zu erklären sind: Man kann auf Schülerniveau ja schließlich keine Quantenelektrodynamik präsentieren. Die Modelle haben also jeweils eingeschränkten Nutzen, daher muss man sie mit Bedacht auswählen (siehe weiter unten „Modellwahl“ in diesem Abschnitt).

Wenn man sich die optische Abbildung mit der Lochkamera in diesem Flüssigkeitsmodell des Lichtes vorstellt, dann repräsentiert ein Flüssigkeitsstrom das Lichtbündel, das sich mit der Geschwindigkeit c ausbreitet. Wenn wir dann das Experiment in einer Wasserwanne durchführen und das Phänomen durch einen gefärbten Wasserstrom darstellen würden, würde das Lochkamera-Experiment genauso ablaufen: Wir hätten einen Gegenstand, der abgebildet werden soll, eine Blende und eine Mattscheibe. Der Gegenstand würde dann mit drei Wasserpistolen so beschossen, dass der Wasserstrom danach durch das Loch kann bzw. eben nicht kann (Anlehnung an die Abbildung 6-4). Dann ergibt das auf der Mattscheibe – für kurze Zeit, solange sich das farbige Wasser nicht vermischt – ein umgekehrtes Bild. Der Flüssigkeitsstrom genügt also als Modell, um zu zeigen, was mit dem Licht im Experiment geschieht.

Bei der Modellwahl hätte man aber auch eine andere Richtung einschlagen können, welche an das **Teilchenmodell des Lichtes** angelehnt ist. In dem gleichen Experiment würden wir dann als Lichtquellen ganz starke Sprühpistolen unterschiedlicher Farbe einsetzen. Der Gegenstand würde dann so besprüht, dass der Sprühstrahl durch das Loch kann bzw. nicht kann. Dann würde das auch ein umgekehrtes Bild ergeben. In diesem Prozess würden kleine Farbpigmente transportiert, was man Eins zu Eins auf das Photonenmodell des Lichtes abbilden kann. Das Lichtbündel wäre hier durch einen Teilchenstrahl repräsentiert. Damit wäre für das Lochkamera-Experiment auch eine adäquate Erklärung angeboten, die bei den Schülern die gleiche Einsicht bringt, wie die Vorstellung des Flüssigkeitsmodells.

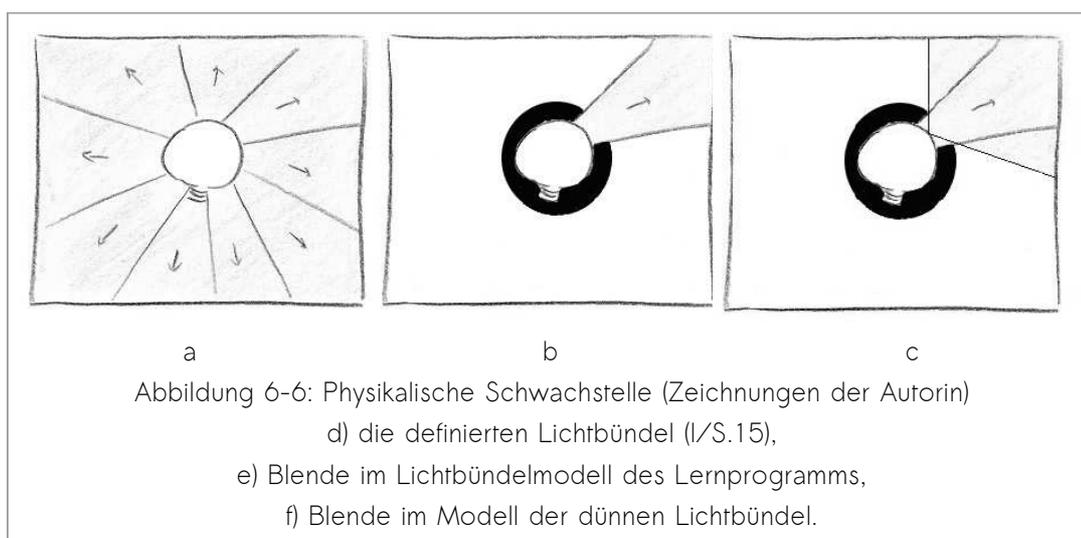
Wir haben also unterschiedliche Modelle des Lichtes, die die Phänomene der Lichtausbreitung und der optischen Abbildung adäquat beschreiben können. Beide Modelle befinden sich für die Schüler auf der gleichen Abstraktionsebene. Im Prinzip ist also egal, welches Modell herangezogen wird. An dieser Stelle wurde eine Entscheidung getroffen, um das Lernverhalten zu untersuchen: Wir stellen die Lichtausbreitung mit dem Flüssigkeitsmodell des Lichtes dar. Die Inhalte des Lernprogramms werden mit den Modellen „Lichtbündel“, „Punktlichtquelle“, „dünne Lichtbündel“ und „Flüssigkeitsmodell des Lichtes“ beschrieben. Durch diese Modellwahl wird das Lernprogramm zur Brücke zwischen dem rein phänomenologischen Ansatz³⁰ und geometrische Optik. Diese fachdidaktische Positionierung ermöglicht einen vielfältigen Einsatz des Lernprogramms im Physikunterricht: als Einführung in die geometrische Optik (Klasse 6) und auch als Wiederholung vor der Wellenoptik (Klasse 10). Für die Probanden der Untersuchung (Klasse 8) sind deshalb die gewählten Modelle des Lichts ebenfalls angemessen.

30 Dieser Ansatz versucht eine modellfreie Optik zu betreiben, also als Grundlage der Erkenntnisgewinnung die Beschreibung von Phänomenen und die eigene Wahrnehmung zu setzen und weiterhin „die Erscheinungswelt des Alltags mit methodisch durchsichtigen Zugängen zur modernen Physik“ zu verknüpfen (Grebe-Ellis, 2006, S.1).

Physikalische Schwachstellen

Ein Ziel des Lernprogramms ist, den Lerninhalt – dem „single concept principle“ entsprechend – Schritt für Schritt zu erklären (Abschnitt 1.3). Das ist zwar wegen der Entlastung des Arbeitsgedächtnisses ein Vorteil des Lernprogramms, kann aber zu einer Schwierigkeit führen: Die Autoren können bei der Erklärung schnell an die Grenzen der einzelnen Modellen stoßen. Was ist damit gemeint?

Die Lichtbündel, die durch die Zerlegung des Lichtes eingeführt werden (I/S.14f, Abbildung 6-6a), sind eigentlich in sich physikalisch falsch. Um das zu zeigen, hüllen wir unsere Glühlampe so ein, dass nur eine schmale Blende das Licht durchlässt. Das, im Lernprogramm definierte Lichtbündel wäre in diesem Fall ein, durch die Blende begrenzter schmaler Lichtkegel sein (Abbildung 6-6b). In der Wirklichkeit aber kommen von jeder Punktlichtquelle der Öffnung mehrere dünne Lichtbündel heraus, die außerhalb des definierten Lichtkegels führen (Abbildung 6-6c). Man kann natürlich die einhüllende Fläche aller dünnen Lichtbündel als Mantel des Lichtkegels nehmen und das Lichtbündel so definieren. Im Lernprogramm wird jedoch nur ein bestimmter Aspekt der Realität gezeigt. Aus diesem Grund ist das definierte Lichtbündel auch ein Modell, was mit einer gewissen Ungenauigkeit einhergeht: Es ist ungewiss, wie die einzelnen dünnen Lichtbündel innerhalb des Lichtkegels verlaufen.



Das Licht füllt im Lichtkegel-Modell den ganzen Raum nur dann aus, wenn man es zweidimensional zeichnet (I/S.14f, Abbildung 6-6a). Im Fall einer dreidimensionalen Darstellung der Lichtkegel gäbe es Bereiche im Raum, die nicht mit Licht ausgefüllt sind. Diese Problematik hat sich mit der Einführung der dünnen Lichtbündeln und Punktlichtquellen (I/S.17-25) gelöst, mit denen man auch dreidimensional korrekt arbeiten kann (I/S.33-35).

Ein Fehler des Lernprogramms (was vor der Untersuchung nicht korrigiert wurde) ist, dass sich das Licht in der zweidimensionalen Darstellung auch in die Richtung der Lampenfassung ausbreitet (I/S.14f, Abbildung 6-6a). Hier sehen wir eine Problematik zwischen der Realität und der Idealisierung des Physikers. Wir haben eine bestimmte Art, auf die Lampe zu schau-

en. Wir tun so, als ob es diese Fassung da nicht geben würde. Wir tun so, als ob es möglich wäre, dass man die Fassung vernachlässigen kann. Wo aber die Fassung ist, kommt definitiv kein Licht heraus. Wie gehen die Schüler damit um? Die Erfahrung des Kindes ist, dass Licht überall ist. Nur wenn das Kind über grundlegendes Wissen verfügt und anfängt, logisch zu denken, weiß es, dass hinter der Fassung Schatten oder zumindest Halbschatten auftritt. Um genau diese logisch-schlüssige Denkweise zu schärfen, kann das Bild im Physikunterricht zur Diskussion angeboten werden.

Als Darstellerin habe ich an dieser Stelle auf eine möglichst minimale kognitive Belastung der Schüler geachtet. Ich kann nicht mit einem Bild, sowohl die Einführung der Lichtbündel, als auch die Schattenkonstruktion lehren wollen. Das würde zum *cognitive overload* führen (Abschnitt 1.2). Ich könnte aber an dieser Stelle des Lernprogramms einen Zwischenschritt einbauen und die Glühlampe im Profil mit einem entsprechenden Schattenbereich darstellen. In einem nächsten Schritt würde ich dann die Perspektive wechseln und die Lampe in der Aufsicht, also von oben und ohne die Fassung zeigen. Die Lampe wäre dann ein runder Kreis, von dem die Lichttrichter ausgehen. Diese Darstellung wäre noch stärker reduktionistisch, gleichzeitig aber physikalisch korrekt und der Wirklichkeit entsprechend.

Die Leitfrage bei der **Modellwahl** war: Mit welchem physikalisch reduktionistischem Modell kann man das Phänomen der optischen Abbildung beschreiben? Ein didaktisch akzeptables Modell muss nicht die Physik in allen ihren Einzelheiten widerspiegeln, es darf also vereinfacht sein. Eine didaktische Reduktion ist unausweichlich, da man den Schülern nicht alles auf einmal erläutern kann. Es sind jedoch Forderungen, derer es entsprechen sollte:

- (1) Es muss in sich stimmig sein, d.h. es müssen alle Überlegungen, die wir im Rahmen der Modellwelt ziehen, logisch nachvollziehbar sein.
- (2) Es muss bezüglich der Phänomene, die wir in der Natur als Beobachtung wiederfinden, eine korrekte Beschreibung abgeben.
- (3) Es muss didaktisch angemessen sein, d.h. es soll auf das Vorwissen der Schüler aufbauen und logische Schritte aufweisen, die für die Schüler nachvollziehbar sind.

Schon bei der zweiten Forderung können wir auf die Grenzen der Modelle stoßen: Bei dem logisch-deduktiven Durchdenken der Schlussfolgerungen eines fachdidaktischen Modells können wir nämlich auf Konsequenzen stoßen, die mit bestimmten Naturbeobachtungen nicht übereinstimmen. Dabei ist nicht zu vergessen, dass das, was wir heute für die physikalisch „absolute Richtigkeit“ halten, lediglich auch nur Modelle sind, deren Modifizierung in der Zukunft noch nötig sein kann: Eine spätere physikalische Erfahrung kann uns noch zeigen, dass es zwischen dem Modell und der experimentellen Beobachtung dennoch einen Widerspruch gibt. Das fachdidaktische Modell soll also nur mit dem Phänomen in Übereinstimmung sein, wofür es als Erklärung herangezogen wird.

Das Lichtbündelmodell des Lernprogramms genügt sowohl physikalisch, als auch fachdidaktisch nicht den Kriterien, die ein adäquates Modell aufweisen sollte: Es ist physikalisch unpräzise und man kann damit nicht durchgängig alles erklären. Es vermittelt den Schülern jedoch

eine erste Vorstellung, weshalb es als Lernschritt legitim ist. Auf diese Vorstellung folgt dann ein schlüssiges und auch für die Schüler adäquates Denkmodell³¹, das Modell der dünnen Lichtbündel. Gerade diese Übergänge zwischen Modellen sind wichtige Entwicklungsschritte in der Formung der physikalischen Sichtweise der Schüler. Als Fachdidaktiker suchen wir nach solchen, möglichst optimalen Übergängen zwischen den Modellen.

Das Lichtbündelmodell ist gerade mit seiner Unvollkommenheit und Fehlerhaftigkeit didaktisch gut nutzbar: Es eignet sich für die Diskussion über die prinzipielle Begrenztheit von Modellen und führt damit zum logischen Nachdenken über die Natur hin, was nach meiner Auffassung eine wichtige Aufgabe des Physikunterrichts ist.

Aber davon einmal abgesehen soll das Lernprogramm im Kontext der vorliegenden Studie als Werkzeug dienen, um das Schülerverhalten zu untersuchen. Das Ziel der Modellwahl war also nicht, die Physik der Lochkamera für alle Zwecke fehlerfrei darzustellen. Die physikalischen Schwachstellen des Lernprogramms sind daher für die Studie nicht relevant, da es sich hier primär um eine fachdidaktische Fragestellung handelt, und zwar um die Lernwirksamkeit von Bildern, Animationen und Notizen.

6.2 Alltagsvorstellungen

Schüler bringen ihre eigenen Vorstellungen in den Physikunterricht mit. Diese „vorhandenen Vorstellungen“ sind grundlegend im Lernprozess: Durch die Verknüpfung der neuen Information mit dem Vorwissen, kann der aufgenommenen Information ein Sinn gegeben werden. An dieser Stelle können Alltagsvorstellungen auch zum Nachteil im Wissenserwerb werden: sie bestimmen, wie schließlich der Lerninhalt (miss)verstanden wird (Jung, 1986, S.100f). Die Alltagsvorstellungen führen nicht selten zur erheblichen Lernschwierigkeiten, die physikalischen Vorstellungen zu akzeptieren bzw. zu lernen, weil sich physikalische Ideen und Alltagskonzepte oft widersprechen (Wiesner, 1995, S.127, 142). Die Alltagsvorstellungen verhalten sich dann hartnäckig im Lernprozess:

- Die Schüler sind mit ihren lebensweltlichen Erklärungen zufrieden und spüren daher kein Bedürfnis, physikalisches Wissen zu verwenden (Jung, 1989, S.42).
- Die Schüler verdrängen erst die Alltagsvorstellungen, später aber greifen sie darauf wieder zurück und das physikalische Wissen wird vergessen (Jung, 1986, S.103; Wiesner, 1995, S.137).
- Die Schüler behalten ihre eigenen Alltagsvorstellungen. Die Lerninhalte werden in diesem Rahmen gedeutet bzw. die passenden Elemente der physikalischen Sichtweise werden eigenartig mit Alltagsvorstellungen gemischt und verbunden (Jung, 1989, S.43; Gropengießer, 1997, S.84; Staruschek, 2003, S.39).

Im Mittelpunkt des fachdidaktischen Interesses steht, einen physikalischen Verstehensrahmen aufzubauen. Um dieses Ziel zu erreichen, wird die Vielfalt der Vorstellungen als das Ergebnis

³¹ Unter „Denkmodell“ verstehe ich, das – in dieser Arbeit oft verwendete – mentale Modell.

der bisherigen Lerngeschichte bewusst wahrgenommen und akzeptiert. Somit können Alltagsvorstellungen ihre Qualität behalten und in lebensweltlichen Situationen ihren praktischen Sinn entfalten. Es bedarf eher eine metakognitive Einsicht, dass es hier zwei Denkmodelle gibt, die jeweils in bestimmten Kontexten erfolgreich eingesetzt werden können (Schnotz, 1998; Gropengießer, 1997, S.84). Die unterschiedlichen Modell- und Alltagsvorstellungen sind jedoch kein Hauptgegenstand der Untersuchung. In diesem Abschnitt soll ein kurzer Einblick in die Schülervorstellungen geschehen, anhand derer das Kategoriensystem des Wissenstests T₃ entwickelt wird (Abschnitt 8.7.1, Anhang D.6).

Licht und Lichtausbreitung

Das Wort „Licht“ wird von Schülern nicht unbedingt in einem physikalischen Sinne verwendet. Im naiven Konzept (Jung, 1989, S.37; Guesne, 1984, S.81) wird Licht gleichgesetzt mit

1. seiner Quelle (Sonnenlicht/ elektrisches Licht/ Licht ist in den Lämpchen, es sind die Lämpchen, die erleuchtet sind),
2. seinen Wirkungen (Licht ist etwas, was hell macht/ Licht macht andere Gegenstände hell),
3. mit einem Zustand (es ist hell/ Licht ist Helligkeit).

In diesem naiven Konzept ist die Beziehung zwischen Licht (1) und Licht (2), die einer Fernwirkung. Das Licht bleibt auf dem beleuchteten Gegenstand liegen. Diese beleuchteten Gegenstände können selbst andere Gegenstände nicht beleuchten, sie „strahlen“ nicht. Das pseudo-physikalische Konzept beruht auf folgenden Vorstellung von Schülern (Merzyn, 1984, S.34; Guesne, 1984, S.82f; Jung, 1989, S.38):

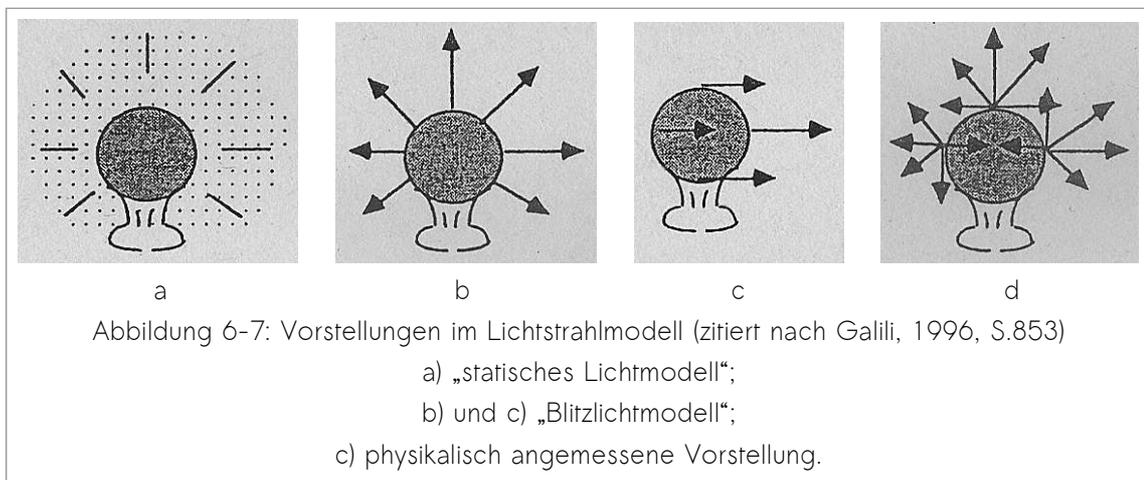
4. Licht ist wie eine hell machende Substanz, die von den Lichtquellen ausströmt. In diesem Konzept geschieht eine dynamische Vermittlung: Licht (4) wandert/ strömt/ bewegt sich ständig von Licht (1) zum Gegenstand und in den Raum.

Zwischen diesen zwei extremen Beschreibungen findet man auch alle Zwischenstufen. Der Hauptunterschied jedoch ist, dass Licht (1-3) von den Schülern nicht als etwas Dynamisches verstanden, sondern eher statisch gesehen wird. Das Ziel ist deshalb den Wechsel zwischen „**Licht als Zustand**“ zum „**Licht als Prozess**“ einzuleiten (Wiesner & Engelhardt, 1987, S.380; Galili & Hazan, 2000, S.63). Edith Guesne (N=30; 1984, S.82) beobachtete eine spontane qualitative Veränderung in den Vorstellungen von älteren im Vergleich zu jüngeren Schülern (13-14 vs. 10-11 Jahre). Ältere Schüler verwendeten im Zusammenhang mit Licht mehr dynamische Ausdrücke, außerdem hat die Mehrheit der älteren im Unterschied zu den jüngeren Schülern die vierte oben genannte Vorstellung vom Licht. In einer anderen Studie war auch für die gleiche Altersklasse bekannt, dass Licht zur Ausbreitung Zeit benötigt (N=207, 7-9.Klasse, Gymnasium; Wickihalter, 1984, S.75). Die Lernvoraussetzungen für die vorliegende Untersuchung werden anhand dieser Ergebnissen festgelegt. Weil das Alter ihrer Versuchspersonen dem unserer Probanden entspricht (Abschnitt 8.4), wird angenommen, dass die Schüler bereits über Helligkeitsvorstellungen verfügen. Demzufolge wird im Lernprogramm ein elaborierteres Modell des Lichtes „als strömende Substanz“ verwendet (Abschnitt 6.1). Auch wenn die Schüler von einer dynamischen Lichtausbreitung ausgehen, unterscheiden sich

die Vorstellungen in der Zeitdauer und Reichweite der Ausbreitung (Wiesner, 1986, S.25; 1995, S.134; Guesne, 1984, S.83, 90, 97):

- Das Licht ist sofort da bzw. benötigt eine bestimmte Zeit. Dabei können die Schüler sich einen kontinuierlichen Lichtstrom vorstellen oder nur an die Entstehung des Lichtkegels beim Einschalten denken. Die Vorstellungen werden auch anhand der Wahrnehmung bestimmt: Bei Lichtquellen der unmittelbaren Umgebung, braucht das Licht keine Zeit zur Ausbreitung. Die Zeit gewinnt erst intersolar an Bedeutung.
- Das Licht breitet sich nur begrenzt weit aus bzw. breitet sich bis zum Unendlichen aus. Die Schüler stellen sich nur bei großen Entfernungen die Lichtausbreitung explizit vor. Bei nahen Lichtquellen und Lichtquellen mit geringer Intensität meinen die Schüler, dass das Licht nicht mehr ins Auge kommen muss, um das Objekt zu sehen.

Der Einsatz von Animationen im Lernprogramm, die den Prozess der Lichtausbreitung visualisieren, ist daher begründet. Da es sich bei dem Prozesscharakter um eine grundlegende Eigenschaft des Lichtes handelt (Abschnitt 6.1), wird er an der Stelle das erste Mal visuell dargestellt, wo auch die anderen Grundeigenschaften des Lichtes beschrieben werden (I/S.11f). Weiterhin wird die Lichtausbreitung bei Alltagsgegenständen gezeigt (I/S.25). Ein differenzierteres Lernziel wäre: Je weiter man von der Lichtquelle ist, desto später kommt das Licht zu ihm an. Dies wird aber nur als Transferleistung im Wissenstest T₃ erhoben. Innerhalb des Lichtstrahl- bzw. Lichtbündelmodells entwickeln sich auch Alltagsvorstellungen. Sie wurden von Galili (1996, S.853f) und Galili & Hazan (2000, S.70) beschrieben (Abbildung 6-7):



- „statisches Lichtmodell“ (repräsentiert die Helligkeit der Quelle, entspricht den oben kategorisierten Vorstellungen des Lichtes 1-3),
- „Blitzlichtmodell“ (das Licht breitet sich von der Quelle in radialen Strahlen oder geradlinig nur zum Beobachter aus)³²,
- physikalisch angemessene Vorstellung der Lichtausbreitung (von jedem Punkt der Quelle breitet sich das Licht in alle Raumrichtungen aus).

³² Der Ausdruck „Blitzlicht“ verdeutlicht den Prozesscharakter dieser Vorstellung.

Das „Blitzlichtmodell“ wird im Lernprogramm als „Sonne“ vs. „Punktlichtquelle“ explizit thematisiert (I/S.21 vs. S.24f, Abschnitt 7.2), damit die physikalisch angemessene Vorstellung von den Schülern organisch entwickelt werden kann.

Optische Abbildung mit der Lochkamera

Im Lernprogramm wird die Behandlung der Lochkamera als Zugang zur Optik gewählt. Für diese Entscheidung spricht, dass das Lichtbündelmodell zur Erklärung der Bildentstehung herangezogen werden kann, gleichzeitig die Lochkamera das einfachste optische Instrument ist (Laux, 1984, S.38). Das zur Abbildung führende optische Element ist grundsätzlich die **Blendenöffnung**. Diese, im Vergleich mit der Größe der Lichtquelle, kleine Öffnung erzeugt ein Bild auf der Mattscheibe. Im Lernprogramm wird zum Gegenstand der Abbildung eine Kerzenflamme, die in eine Vielzahl von Punktlichtquellen zerlegt wird, die dünne Lichtbündel in alle möglichen Richtungen aussenden (s. dazu Abschnitt 6.1). Die Lochblende selektiert dann einen Teil der dünnen Lichtbündel: Auf der Mattscheibe entsteht ein „Lichtfleck“ (I/S.33-36). Das Zustandekommen der Abbildung wird auf dieser Weise „Lichtfleck für Lichtfleck“ erklärt (I/S.37): Jedem Gegenstandspunkt wird ein Bildpunkt zugeordnet, sie zusammen ergeben dann das Bild. Diese Erklärungsweise orientiert sich an der einschlägigen Literatur (Feher & Rice, 1988, S.4; Herdt, 1990, S.90; Laux, 1984, S.40; Muckenfuß, 1996, S.16; Wiesner, 1986, S.126).

Das Verständnis der optischen Abbildung mit der Lochkamera beschränkt sich also auf wenige grundlegende Rahmenvorstellungen, trotzdem existieren zu diesem Themenfeld auch Alltagsvorstellungen. In der Studie von Feher & Rice (1988, S.6) vertritt z.B. ein Teil der Schüler eine holistische Vorstellung: Das Licht breitet sich als ein Ganzes in Form der geometrischen Gestaltung der Lichtquelle aus. In dieser Vorstellung fehlt ein grundlegendes Konzept, nämlich dass jeder Punkt der Quelle Lichtbündel in alle Richtungen aussendet, wobei für die Abbildung nur diejenigen Lichtbündel verantwortlich sind, welche auch durch das Loch gelangen.

Physikalischer Sehvorgang

Schüler haben erhebliche Schwierigkeiten eine physikalische Theorie des Sehens zu lernen bzw. zu akzeptieren. Es zeigt sich ein unphysikalisches Antwortverhalten in den Klassenstufen 7 bis 9 (N=207, Gymnasium; Wickihalter, 1984, S.74). Welche Beschreibungen des Sehens bevorzugen die Schüler und warum?

Eine weit verbreitete Vorstellung ist, dass die **Helligkeit des Lichts** uns das Sehen ermöglicht (Guesne, 1984, S.90). Unter „Helligkeit“ verstehen die Schüler ein „Lichtbad“ und nicht die Intensität des Lichtes. Es wird auch keine Verbindung zwischen Gegenstand und Auge hergestellt.

Alltagsvorstellungen werden von Erfahrungen bestimmt: Es spürt niemand, dass Licht vom gesehenen Gegenstand ins Auge fällt. Vielmehr erlebt man eine gewisse Aktivität des Blickens. Daraus können zwei Vorstellungen entstehen:

1. **Sehstrahlen**, die ihren Ursprung im Auge haben und von dort ausgehend die Gegenstände abtasten (Jung, 1986, S.103). Dieses historische Modell tritt bei den Schülern nur selten auf (Guesne, 1984, S.94).
2. **Aktive Auge**. Die Augen sind aktiv im Sehprozess, sie konzentrieren sich auf ein Gegenstand. Aus dieser Alltagserfahrung stammt die Beschreibung „wir sehen etwas, weil wir da hinschauen“ (Gropengießer, 1997, S.72).

Die Alltagsvorstellungen vom aktiven Auge sind ziemlich stabil. Dies gründet in lebensweltlichen Erfahrungen des Sehens, deshalb sind und bleiben sie auch Teil unseres kognitiven Systems. Diese Vorstellungen werden auch sprachlich weitergetragen (einen Blick zuwerfen/sich den Blicken aussetzen; Merzyn, 1984, S.33; Gropengießer, 1999, S.76). Bei der physikalischen Betrachtung des Sehvorgangs werden keine physiologischen und psychologischen Aspekte des Sehens einbezogen, obwohl sie das Vorwissen der Schüler bestimmen. Der aktive Betrachter ist mit dem psychologischen Aspekt verbunden („wahrnehmen, erkennen“) und unterscheidet sich grundlegend von dem „passiven Lichtempfänger“ der physikalischen Beschreibung („sehen“). Beide Erklärungsweisen sind der Wirklichkeit angemessen. Man muss lernen sich zu entscheiden, in welchen Zusammenhängen die jeweilige Erklärungsweise angebracht ist (Guesne, 1984, S.93; Gropengießer, 1997, S.72).

Eine, für die Schüler angemessene physikalische Vorstellung vom Sehvorgang kann durch eine solide grundlegende Vorstellung vermittelt werden. Es ist die **Sender-Empfänger-Vorstellung**: Eine Lichtquelle strahlt Licht in alle Richtungen ab, auch in Richtung unseres Auges. Wenn ein Teil dieses Lichtes ins Auge fällt, sehen wir den Gegenstand, der das Licht abstrahlt. Diese physikalische Betrachtung des Sehvorgangs kann durch das Abbild der Lichtquelle auf dem Netzhaut ergänzt werden (Netzhautbild). Als einfaches Augenmodell kann eine Lochkamera verwendet werden. Die Pupille entspricht dabei der Blendenöffnung, die Netzhaut der Mattscheibe (Wiesner & Engelhardt, 1987, S.380). Eine andere experimentelle Demonstration der Sender-Empfänger-Vorstellung ist, den Lichtweg stets von der Lichtquelle (eventuell über beleuchtete Gegenstände) bis zum Auge zu verfolgen (Jung, 1979). Der Möglichkeiten des multimedialen Lernprogramms entsprechend werden für die visuellen Darstellung des physikalischen Sehvorgangs Bilder und Animationen eingesetzt: Die Beziehung zwischen Sender (Lichtquelle, Gegenstand) und Empfänger (Auge, Mattscheibe) wird durch die dünnen Lichtbündel hergestellt (I/S.25, I/S.33-36).

Streuung

Grundlegend für eine physikalisch angemessene Vorstellung der Wahrnehmung von Gegenständen ist die Streuung des Lichtes an deren Oberflächen. Die Schwierigkeit besteht hier in einer größeren Abstraktion, weil der Sender in diesem Fall ein nicht direkt leuchtender Gegenstand ist. Er leuchtet mit diffusem Licht.

Die Mehrheit der Schüler sieht dagegen keine Verbindung zwischen der Lichtquelle, dem Gegenstand und dem Auge: das Licht macht die Gegenstände hell und ermöglicht dadurch, sie zu sehen. Diese Vorstellung überwiegt bis zur Sekundarstufe I. Auch Schüler der Sekundarstufe I behaupten, das auftreffende Licht macht den Gegenstand hell und damit sichtbar. Es wird aber

keine Verbindung zwischen Auge und Gegenstand für notwendig gehalten. Das Licht bleibt dann auf der Oberfläche liegen oder verschwindet allmählich. Diese Idee wird von der unmittelbaren Erfahrung abgeleitet: mit einem Blatt Papier kann man niemandem blenden, wie mit einem Spiegel. Das Licht muss also entweder auf dem Papier bleiben oder verschwinden. Praktisch vermutet kein Schüler, dass gewöhnliche Gegenstände Licht zurückwerfen. Licht existiert für diese Schüler nur, wenn es intensiv genug ist, um wahrnehmbare Effekte hervorzurufen (Guesne, 1984, S.85, 95f). Hier wird einsichtig, warum strahlengeometrische Konstruktionen bei den Schülern eine dürftige Lernwirkung haben: Da die Schüler die Vorstellung ablehnen, dass die Gegenstände, die abgebildet werden, Licht abstrahlen, bilden diese Konstruktionen für sie einen leeren, formalen Algorithmus (Wiesner, 1995, S.137). Daher soll im Optikunterricht aller erst eine solide physikalische Vorstellung der Streuung eingeführt werden: Bei der Streuung wird Licht vom Gegenstand in alle Richtungen abgestrahlt, weshalb alle Schüler trotz der Beobachtung aus verschiedenen Richtungen den Gegenstand sehen können. Der abstrahlende Körper ist der Sender und das Auge der Empfänger des Lichtes (Wiesner & Engelhardt, 1987, S.380; Wiesner, 1995, S.130). Die Gefahr besteht hier darin, dass die Streuung unter die Reflexion subsumiert wird.

In Anlehnung auf diese Erkenntnisse wird im Lernprogramm aller erst das Lochkamerabild eines beleuchteten Gegenstandes beobachtet (II/S.21), die Lichtstreuung verdeutlicht (II/S.23f) und anschließend werden die Wege des Streulichts bei der Abbildung mit der Lochkamera gezeigt (II/S.25f).

Zusammenfassung

Die Animation der Lichtausbreitung stellt bei dem genannten Lerngegenstand (optische Abbildung) ein gezieltes Angebot dar, um Schüler zu helfen, den Übergang von Alltags- zu physikalischen Vorstellungen zu bewerkstelligen. Ein nicht wahrnehmbarer Vorgang wird visualisiert. Das Lernprogramm zielt damit nicht nur auf den Wissenserwerb zur optischen Abbildung, sondern indirekt auch auf die Veränderung der Alltagsvorstellungen zur Lichtausbreitung sowie zum physikalischen Sehvorgang und bereitet einen möglichen Transfer auf die Erklärung des Sehens durch Lichtstreuung vor. Wir betonen, dass wir keinen vollständigen Konzeptwechsel erwarten, sondern eine Weiterentwicklung der Alltagsvorstellungen zu so genannten metastabilen Zwischenzuständen, die einen Entwicklungsschritt zu physikalischen Vorstellungen anzeigen (Wiesner, 1995; Petri & Niedderer, 2001). Durch die, durch das zweiteilige Lernprogramm bedingte, kurze Treatmentphase kann man nur kleinere Verschiebungen in den Schülervorstellungen erzielen. Dies reicht jedoch für eine fachdidaktische Begründung der eingesetzten Visualisierungen aus.

7 Gestaltung des Lernprogramms

*„Was gelten soll, muß wirken und muß dienen.“
(Goethe)*

Zur Untersuchung der Lernwirksamkeit von statischen vs. dynamischen Bildern und der Instruktion „Notizen“ ist eine Lernumgebung nötig, die diese Komponenten darstellen kann. Die Texte, Bilder und Animationen wurden deshalb in ein computergestütztes Lernprogramm eingebettet, welches insgesamt aus drei Teilen besteht. Für die vorliegende Untersuchung wurden die ersten zwei Teile eingesetzt: „Die optische Abbildung mit der Lochkamera I und II“ (Staraschek & Berger, 2003, 2004; Anhang A)³³. Mit dieser, gegenüber anderen Studien (Blömeke, 2003, S.59), verlängerten Treatmentphase soll die Wiederholbarkeit der möglichen Effekte gesichert werden.

Das Programm umfasst einige Besonderheiten, die das Lernen erleichtern sollen. Es wurde gemäß dem Stand der kognitionspsychologischen Multimediaforschung (Abschnitt 1.3, 1.4) und unter fachdidaktischer Perspektive konstruiert. Mit der fachdidaktischen Perspektive ist gemeint, dass das Lernprogramm so geschrieben und die Untersuchung so angelegt wurden (Abschnitt 8.4 „Stichprobe“ und 8.5 „Rahmenbedingungen“), dass die Ergebnisse außer dem Erkenntnisgewinn auch für die Schulpraxis einen Nutzen bringen können. Im Folgenden werden die fachdidaktischen (7.1), inhaltlichen (7.2), gestalterischen (7.3) und visuellen Aspekte (7.4) des Lernprogramms näher beschrieben, sowie die Studien zur Optimierung der Grafik (7.5) vorgestellt. Außerdem werden die Ergebnisse der Blickbewegungsanalyse (7.6) beschrieben.

7.1 Fachdidaktisch angemessene Gestaltung

Bei der Gestaltung des Lernprogramms wurde versucht, die Kritikpunkte an den, das Multimedialernen betreffenden Forschungsvorhaben (Abschnitt 1.4, Staraschek & Rabe 2004) zu beachten und nach Möglichkeit zu korrigieren. So wird angestrebt, dass die gewonnenen Aussagen leichter auf den schulischen Physikunterricht übertragen werden können. Aus fachdidaktischer Perspektive wurden die folgenden Aspekte berücksichtigt:

Länge des Lernprogramms

In der medienbezogenen Forschung werden sehr kurze Treatments mit einer Dauer von wenigen Minuten untersucht (Blömeke, 2003, S.59). Im Bereich der Didaktik der Naturwissenschaften wird inzwischen auch mit Lernprogrammen gearbeitet, die eine längere Darbietungsdauer haben (Lewalter, 1997; Kramer, 2005; Rabe, 2006; Kasper, 2006; Rubitzko, 2006). Ihre

³³ Das Lernprogramm ist unter der Federführung von Erich Staraschek an der Universität Potsdam entstanden. Mitarbeit: K. Berger & T. Rabe. Bildideen: E. Staraschek, K. Berger. Bildgestaltung, Animationen und Programmierung: K. Berger.

Entwicklung für die Schule steht jedoch noch am Anfang. Die Darbietungsdauer des vorliegenden Lernprogramms beträgt etwa 15 bis 20 Minuten. Die Bearbeitungsdauer für die Schüler beträgt im Durchschnitt etwa 30 bis 35 Minuten (Abschnitt 9.8). Da diese Länge jeweils mit einer Unterrichtsstunde kompatibel ist, erlaubt sie es, die Untersuchung unter schulischen Rahmenbedingungen durchzuführen und das Lernprogramm später als Unterrichtseinheit einzusetzen.

Themenwahl

In der Medienforschung werden zwar physikalische Inhalte untersucht, wobei es sich aber um relativ einfache Sachverhalte (Blömeke, 2003, S.59), häufig ohne curriculare Anbindung (Staraschek & Rabe, 2004, S.114), handelt. Als zentrale Themen für das Lernprogramm dieser Untersuchung wurden die optische Abbildung und die Eigenschaften des Lichtes gewählt. Sie sind sowohl vom fachdidaktischen als auch vom allgemeinbildenden Gesichtspunkt aus als relevante Inhalte anzusehen (Abschnitt 6.1). Mit dieser Themenwahl werden die curriculare Anbindung an den Schulunterricht und der Anspruch an eine höhere Komplexität des Inhalts erfüllt. Die Komplexität des Stoffes hat weiter zur Folge, dass sein Erlernen über Behaltensleistungen hinausgeht und Transferleistungen erfordert (siehe dazu Abschnitt 8.3.4).

Schülervorstellungen

Im Lernprogramm werden Schülervorstellungen aufgegriffen, die in der Medienforschung außerhalb der Fachdidaktik keine Berücksichtigung finden. Zusätzlich zur optischen Abbildung greifen die Animationen und teilweise auch die Texte die Themen Lichtausbreitung, physikalischer Sehvorgang und Streuung auf (Abschnitt 6.2, 7.4).

Baukastenprinzip

Das Lernprogramm wird technisch nach dem Prinzip eines Baukastens realisiert. Das bedeutet, dass einzelne Elemente des Lernprogramms ohne große Veränderungen des gesamten Programms ausgetauscht werden können. So könnten beispielsweise Simulationen die Bilder und Animationen ersetzen, die Texte modifiziert werden oder Aufgaben, kleine Experimente, usw. integriert werden. Die Bearbeitungszeit würde dabei nicht wesentlich verändert. Außer dem flexiblen Einsatz im Unterricht erhält man damit ein Werkzeug, das die neuesten Möglichkeiten zur Optimierung von Lernwegen erforschbar macht und dabei die Grundlagenfragen nicht vergisst.

Textgestaltung

Die Oberflächenstruktur des Textes findet bisher in der multimedialen Forschung nur wenig Beachtung (Moreno & Mayer, 2000; Erich Staraschek, 2001; Rabe et al., 2004). Bei der Textgestaltung für das Lernprogramm wurden Kriterien der Textverständlichkeit beachtet, die in der Fachdidaktik und Linguistik bekannt sind. Das bedeutet, dass kurze Sätze, einfache Wörter, eine geringe Zahl von Fachbegriffen, vermehrte persönliche Ansprache und ein hoher Grad an globaler substantivischer Textkohäsion³⁴ verwendet wurden. Eine detaillierte Be-

³⁴ Die globale Textkohäsion wurde im vorliegenden Lernprogramm durch substantivische Wiederaufnahme her-

schreibung dieser Textmerkmale für das Lernprogramm liefert Starauschek (2006b, S.141). Neben den genannten Merkmalen weist der Text ein hohes Maß an lokaler Textkohäsion³⁵ auf, d.h. dass ca. 60% der Sätze durch ein Substantiv lokal verbunden sind. Diese Entscheidung folgt aus einer Studie (Klasse 7, Gymnasium, N=78), die mit dem Text des Lernprogramms durchgeführt wurde. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die hoch kohäsive Textversion für die Schüler, die den Text gelesen bzw. gehört haben, hinsichtlich des Wissenserwerbs vorteilhafter ist als die niedrig kohäsive Textversion (Starauschek, 2006a, S.61f). Deshalb konnte der Text lokal hoch kohäsiv formuliert werden.

Weitere Untersuchungen geben über die subjektive Einschätzung des Textes durch die Schüler Auskunft (Starauschek, 2006b, S.143): 51% der Schüler der Klasse 7 (N=79) bzw. 56% der Schüler der Klasse 10 (N=121, beide Gymnasium) finden die Texte des ersten Teils des Lernprogramms verständlich. Zum Vergleich soll hervorgehoben werden, dass nur 22% der Schüler (Klasse 8-10, Gymnasium, N=286) traditionelle Physiklehrbücher als verständlich einschätzen (Starauschek, 2001, S.94). Diese Ergebnisse sind zwar nicht direkt vergleichbar, da es sich im einen Fall um ein kurzes Lernprogramm, im anderen Fall um ein Schulbuch handelt, das über einen längeren Zeitraum benutzt wird. Dennoch zeigt sich, dass sich mit dem beschriebenen Set von Textmerkmalen ein leserfreundlicher bzw. nach subjektiver Einschätzung der Lernenden ein verständlicherer Text gestalten lässt. Es wird erwartet, dass diese theoriegeleitet bzw. nach empirischen Befunden gestalteten Texte den *cognitive load* senken, sodass mehr kognitive Ressourcen für den Wissenserwerb zur Verfügung stehen.

Geringe kognitive Belastung

Durch die Möglichkeit, das eigene Lerntempo zu bestimmen, und durch die Anwendung des *single concept principle* (Abschnitt 1.3) wird versucht, die intrinsische kognitive Belastung zu verringern. Dies wird einerseits durch die freie Navigation im Lernprogramm, andererseits durch die Aufbereitung des Stoffes ermöglicht: Der komplexe Lerninhalt wird sequentiell behandelt, d.h. dass der Text einer Seite aus zwei bis fünf Sätzen (im Durchschnitt aus 44 Wörtern) besteht, die eine Sinneinheit bilden. Es wird versucht, der äußeren kognitiven Belastung mit guter Strukturierung und mit konsequenter Anwendung der Gestaltungsprinzipien des Multimedialernens entgegenzuwirken (Abschnitt 1.3, 7.3).

7.2 Inhaltliche Sachanalyse

Das Hauptlernziel des Lernprogramms ist das physikalische Verständnis der optischen Abbildung, das im ersten Teil am Beispiel der Lochkamera, im zweiten Teil am Beispiel der Linse unter Einbeziehung der Lichtstreuung erklärt wird. Weitere Lerninhalte – eine physikalische Modellierung der Lichtausbreitung und des Sehvorgangs – werden ausschließlich in visueller

gestellt (Starauschek, 2006b, S.134).

³⁵ Der Begriff „Textkohäsion“ betont den Aspekt der Kohärenzhilfen im Text. Demgegenüber betont die „Textkohärenz“ (Rabe, 2006, S.103) den Aspekt der mentalen Kohärenzbildung, die der Lernende anhand des Textes herstellt (Starauschek, 2006b, S.130). Da die Textmerkmale in dieser Arbeit eine deskriptive Funktion erfüllen, wird der Begriff „Textkohäsion“ verwendet.

Form mit Animationen vermittelt. Der inhaltliche Aufbau, der in der Tabelle 7-1 stichpunktartig zusammengefasst ist, orientiert sich am didaktischen Ansatz vom Muckenfuß, wie er in Bresler et al. (2003, insbesondere S.5ff) beschrieben ist. Im Folgenden werden die Hauptthemen des ersten (1a-e) und zweiten Teils (2a-d) des Lernprogramms erörtert:

(1a) Im ersten Teil des Lernprogramms wird die optische Abbildung mit der **Lochkamera** zunächst phänomenologisch dargestellt (Tabelle 7-1, I/S.3-9). Das Phänomen wird hier qualitativ durch subjektive Sinneserfahrung erfasst. Dies dient als Motivation und Einstieg in das Thema *Wie entsteht mit einer Lochkamera ein Bild?* Im nächsten Schritt werden die Zusammenhänge zwischen Abstand der Mattscheibe und Größe der Abbildung veranschaulicht (I/S.8-9).

(1b) Danach wird auf die wesentlichen Eigenschaften des Lichts und auf die **Ausbreitung des Lichts** eingegangen. Diese Inhalte bilawindigkeit wird an die Erfahrungen von Schülern angeknüpft: Es wird verdeutlicht, dass der Zeitbedarf für die Ausbreitung des Lichtes für das Auge nicht wahrnehmbar ist, deswegen „scheint es sofort überall zu sein“ (I/S.12). Dieser explizite Hinweis macht den Unterschied zwischen der täglichen Erfahrung und dem physikalischen Sachverhalt bewusst.

(1c) Lichtbündel werden als trichterförmig zerlegtes Licht definiert. **Dünne Lichtbündel** werden phänomenologisch eingeführt (Abschnitt 6.1). Dünne, nahezu parallele Lichtbündel können z.B. durch einen Laserpointer oder näherungsweise durch kleine Blendenöffnungen erzeugt werden.

(1d) Bei der **Punktlichtquelle** werden die Schüler mit der in der Physik gängigen Idealisierung bekannt gemacht. Gedankenexperimente unterstützen dabei die Bildung von Begriffen (Reinhold, 1996, S.15): Eine leuchtende Glühlampe wird zu einem „kleinem Fleck“ reduziert (I/S.23, 26). Diese Punktlichtquelle wird zur Quelle unendlich vieler dünner Lichtbündel (I/S.24). Die Einführung der Punktlichtquelle ist deswegen nützlich, weil jede Lichtquelle sich in Punktlichtquellen zerlegen lässt, von denen sich das Licht in alle Richtungen ausbreitet. Diese Hilfestellung soll für die Schüler einleuchtend machen, dass sich die dünnen Lichtbündel von einer beliebigen Lichtquelle nicht nur radial ausbreiten (siehe dazu Anhang A.1, I/S.21f vs. S.25). Damit wird eine weitverbreitete Alltagsvorstellung aufgegriffen (Abschnitt 6.2).

(1e) Um zu verstehen, dass hinter der Blende einer Lochkamera ein umgekehrtes, seitenverkehrtes Bild entsteht, ist das Modell Lichtstrahl nicht notwendig (Abschnitt 6.1). Die **optische Abbildung** wird mit dem Aussortieren von dünnen Lichtbündeln durch die Lochblende erklärt. Für die Lernenden wird deutlich gemacht, dass für die optische Abbildung *die Blendenöffnung* benötigt wird, ohne die keine Abbildung, sondern nur eine beleuchtete Mattscheibe entsteht (I/S. 39-41, Abschnitt 6.2).

Inhaltlicher Aufbau des Lernprogramms		
erster Teil des Lernprogramms		<ul style="list-style-type: none"> • Einführung: Themenaufriss (2)
	(1a) Lochkamera (phänomenologische Beschreibung)	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau einer Lochkamera (3) • Eigenschaften der Mattscheibe (4-5) • Bildentstehung an der Lochkamera (6) • Bildeigenschaften (7) und ihre Veränderungen in Abhängigkeit von der Position der Mattscheibe (8-9)
	(1b) Eigenschaften des Lichts	<ul style="list-style-type: none"> • Geradlinigkeit, Allseitigkeit (10-11) • Große Geschwindigkeit (12)
	(1c) Lichtbündel und dünne Lichtbündel	<ul style="list-style-type: none"> • Einführung von Lichtbündeln: gedankliche Zerlegung des Lichts in „Trichter“ (13-15) • Experimentelle Realisierung von dünnen Lichtbündeln (17-19)
	(1d) Gedankliche Zerlegung der Lichtbündel in dünne Lichtbündel (20) (Modellebene)	<ul style="list-style-type: none"> • Problemaufriss bei einer Glühlampe (21-22) • Punktlichtquelle (23-24) • Zerlegung einer beliebigen Lichtquelle in Punktlichtquellen und die Ausbreitung von dünnen Lichtbündel (25-29, 32)
	(1e) Optische Abbildung mit der Lochkamera	<ul style="list-style-type: none"> • Abbildung einer Kerzenflamme (30-31) • Bildentstehung auf der Mattscheibe (33-37)
		<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenfassung (38) • Lochblende wird entfernt, das Bild verschwindet (39-41)
zweiter Teil des Lernprogramms		<ul style="list-style-type: none"> • Wiederholung des ersten Teils des Lernprogramms (2-3)
	(2a) Bildqualität bei der Lochkamera	<ul style="list-style-type: none"> • Lochkamera in der Wirklichkeit (4-5) • Vergrößerung der Blende: helles, unscharfes Bild (6-9) • Verkleinerung der Blende: dunkles, scharfes Bild (10-12)
	(2b) Lochkamera vs. Fotoapparat	<ul style="list-style-type: none"> • Loch vs. Linse (13-14) • Optische Abbildung mit der Linse: helles, scharfes Bild (15-17)
	(2c) Streuung	<ul style="list-style-type: none"> • Optische Abbildung mit der Linse: Kerze (18-19) vs. beleuchtete Kerze als Gegenstand (20-22) • Streuung am Kerzenstumpf (23-24) • Abbildung des gestreuten Lichtes (25-26)
	(2d) Veränderungen im Bild	<ul style="list-style-type: none"> • durch die Verschiebung der Mattscheibe vs. der Kerze (27-29)
		<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenfassung (30-32) • Ausblick (33)

Tabelle 7-1: Der inhaltliche Aufbau des ersten und zweiten Teils des Lernprogramms. Die Zahlen in Klammern weisen auf die jeweilige Seitenzahl im Lernprogramm hin (Anhang A).

Im Mittelpunkt des zweiten Teils des Lernprogramms steht die Frage „Wie kann man gute Bilder herstellen?“. Außerdem wird gleichzeitig ein Schritt in Richtung Realität gemacht: Es tauchen zum ersten Mal anstelle von Zeichnungen Fotografien auf, die die Lochkamera, den Gegenstand und das Bild des Gegenstandes zeigen. Diese visuelle Repräsentation unterstützt die Intention der Autoren, die folgenden Inhalte zu verstehen:

(2a) Die **Bildqualität** ändert sich in Abhängigkeit von der Größe der Lochblende (II/S.6-12). Anhand dessen sollen die Schüler zu der Schlussfolgerung gelangen, dass sich mit der Lochkamera keine „guten“ Bilder im Sinne von hell und gleichzeitig scharf herstellen lassen.

(2b) Um helle und gleichzeitig scharfe Bilder zu erzeugen braucht man eine **Linse**.

(2c) Die optische Abbildung mit Hilfe einer Linse wird phänomenologisch beschrieben (II/S.18f). Die Aufmerksamkeit der Lernenden wird darauf gelenkt, dass nur der leuchtende Teil des Gegenstandes (Kerzenflamme) nach der Abbildung auf der Mattscheibe zu sehen ist. Um den ganzen Gegenstand zu sehen, muss man ihn mit einer zusätzlichen Lichtquelle beleuchten (II/S.20f). Dieser Schritt ermöglicht den Übergang zur Erklärung der **Streuung**. Auf der Bildebene wird die Erklärung statt mit Fotos durch Zeichnungen und Animationen unterstützt, die das nicht Sichtbare sichtbar werden lassen: Die Ausbreitung von dünnen Lichtbündeln zum Kerzenstumpf und ihre Streuung. Die Lichtbündel wechseln am Kerzenstumpf ihre Farbe, worauf im Text nicht eingegangen wird (II/S.24-26). Während das einfallende Licht in den Augen einen gelben Reizzustand hervorruft, erzeugt das vom Kerzenstumpf gestreute Licht einen roten. An dieser Stelle war es aus Autorensicht wichtig, das Phänomen realitäts-treu darzustellen, auch wenn die Erklärung erst Jahre später erfolgen wird. Die Streuung wird nicht nur an der einfachen Lichtquelle-Gegenstand-Kombination erklärt (II/S.23f), sondern sie wird auch in der komplexen Situation Lichtquelle-Gegenstand-Linse-Mattscheibe ausführlich beschrieben (II/S.25f). Die Erklärung der Streuung ist hier ein Mittel, um nicht nur die Abbildung leuchtender, sondern auch beleuchteter Gegenstände behandeln zu können. Durch mehr gestreutes Licht können hellere Bilder hergestellt werden (II/S.26). Damit ist die Streuung in die Anfangsfragestellung eingebettet und bleibt nicht ohne Anknüpfungspunkt.

(2d) Drei Seiten (II/S. 27-29) setzen sich damit auseinander, was geschieht, wenn die Mattscheibe bzw. die Kerze verschoben werden. Ihr Abstand zur Linse ist der entscheidende Einflussfaktor für die **Schärfe der Bilder**. Damit sind alle Bedingungen beschrieben, um bei einer optischen Abbildung mit der Linse helle und scharfe Bilder zu erhalten.

Bestimmte Seiten des Lernprogramms (I/S.2, 10, 16; II/S.17) wurden im Sinne eines *advanced organizers* geschrieben: Die Vorstrukturierung des Lerninhalts hilft die äußere kognitive Belastung der Schüler zu verringern (Abschnitt 1.3). Diese Seiten sind nicht mit visuellen Repräsentationen versehen, sodass der Bildfluss unterbrochen wird, was die Aufmerksamkeit der Schüler stärker auf den Text lenken soll. Auf diesen Bildschirmseiten werden die Lehrziele zur Strukturierung des Lernprozesses im Text genannt bzw. es wird begründet, wofür die nächste Erklärung im weiteren Verlauf gebraucht wird. Diese Abschnitte werden oft auch mit einer Frage begleitet. Damit ist die Erwartung verbunden, das Vorwissen von Schüler zu aktivieren. Sie sollen für sich mit Hilfe ihres Vorwissens eine Antwort auf die Frage geben. Die

richtige Antwort wird dann in der Fortsetzung erklärt. Diese Seiten erfüllen weitere Funktionen, wie z.B. das Gelernte zusammenzufassen (I/S.38), eine Brücke zu schlagen zwischen Alltagssprache und Fachsprache bzw. auf die Alltagskonzepte und wissenschaftlichen Konzepte aufmerksam zu machen (I/S.26).

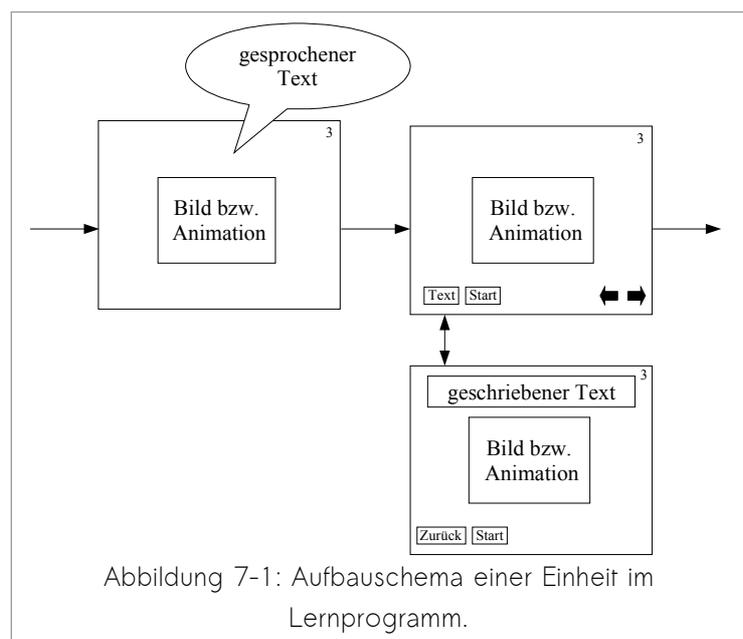
7.3 Kognitionspsychologisch angemessene Gestaltung

Die Gestaltung des Lernprogramms ist stark von kognitionspsychologischen Erkenntnissen geprägt. Im Vordergrund steht der Anspruch einer lernförderlichen Gestaltung, die durch die Reduktion der intrinsischen und extrinsischen kognitiven Belastung erreicht wird. Im Einklang mit diesen Forderungen werden für das Lernprogramm eine **standardisierte Oberfläche** und eine **lineare Struktur** gewählt. Diese Merkmale der Gestaltung werden im Folgenden detailliert beschrieben.

Der erste Teil des Lernprogramms besteht aus 40 „Einheiten“, der zweite Teil aus 32. Das Bild bzw. die Animation zu einer Einheit wird auf drei Bildschirmseiten dargeboten: erstens in Verknüpfung mit gesprochenem Text, zweitens mit Navigationsmöglichkeiten, drittens mit geschriebenem Text (im Folgenden als Textseite genannt). Diese drei inhaltlich identischen Bildschirmseiten, die eine Einheit bilden, wurden mit der gleichen Seitenzahl nummeriert (Abbildung 7-1). Die Schaltflächen unterstützen die Lernwirksamkeit von Animationen („individuelles Lerntempo“, Abschnitt 3.3; Schwan et al., 2000; Mayer & Chandler, 2001). Wie stellt sich dieses Design aus Sicht des Nutzers dar? Wenn man eine neue Einheit beim Vorwärtsnavigieren zum ersten Mal aufruft, dann sieht man nur das statische Bild oder den Ablauf der Animation, gleichzeitig ist der Text dem Modalitätsprinzip entsprechend in auditiver Form dargeboten. Danach wird der Lernende auf die Navigationsseite mit vier Möglichkeiten geführt:

- über die Schaltfläche „Text“ den Text auch in geschriebener Form zu lesen (Textseite),
- über die Schaltfläche „Start“ die Animation erneut anzuschauen,
- mit der Schaltfläche „Vor“ in die nächste Einheit zu gelangen,
- mit der Schaltfläche „Zurück“ auf die Navigationsseite der vorherigen Einheit zu gelangen.

Sowohl zeitlich, als auch in Bezug auf die inhaltliche Struktur zurückliegende Seiten können beliebig oft wiederholt werden. Der Text einer



Einheit wird jedoch nur einmal auditiv dargeboten. Die Animation kann man auf der Text- und Navigationsseite wiederholt starten. Die Schaltfläche „Start“ ist natürlich in der Bildversion des Lernprogramms (Abschnitt 7.4) nicht vorhanden. Das Lernprogramm wurde von der Autorin mit Macromedia Director MX programmiert. Die technische Umsetzung der Animationen erfolgte ebenfalls mit diesem Programm.

In die Gestaltung der Benutzeroberfläche des Lernprogramms flossen grundlegende Zusammenhänge über das Blickfeld des Menschen ein. Da das primäre Blickfeld des Menschen, also der Bereich, der bei unbewegtem Kopf am häufigsten fixiert wird, durch einen räumlichen Öffnungswinkel von 30° beschränkt wird, muss man davon ausgehen, dass „bei den heute üblichen PC-Bildschirmen nicht mehr alle angebotenen Informationen in ihrer Gesamtheit bewusst und mit einem Blick wahrgenommen werden“ (Bauer-Wabnegg & Krause, 2003, S.9). Dies liegt an der verhältnismäßig größeren Fläche des Bildschirms. Deswegen wurde für die Größe der Benutzeroberfläche des Lernprogramms 790 × 530 Pixel gewählt (bei der gängigen Auflösung von Bildschirmen 96dpi entspricht dies 20,9 × 14 cm), die nur ein Teil der ganzen Bildschirm einnimmt. Den Leitlinien der Softwareergonomie entsprechend sind die Schaltflächen für die Steuerung im unteren Bereich der Benutzeroberfläche und die Arbeitsinformation mittig platziert (Zwerina, 1988, S.170). Da alphanumerische Informationen nur 50% der Benutzeroberfläche einnehmen sollten (Zwerina, 1988, S.168), erscheinen maximal vier bis fünf kurze Sätze, im Durchschnitt 39 Wörter pro Seite. Die Abfolge und Platzierung von Sinngruppen, wie Text, Visualisierung und Schaltflächen, bleibt im Lernprogramm konstant. So beansprucht die Bedienung geringe kognitive Ressourcen (Bauer-Wabnegg & Krause, 2003, S.12).

Da die Probanden der Untersuchung nur ein geringes physikalisches Vorwissen besitzen und lediglich über einfache Lernstrategien verfügen (Abschnitt 8.4), ist für positive Lerneffekte eine stärkere Strukturierung des Materials notwendig (Tergan, 2002, S.110). Auf diesem Niveau scheint die **lineare Struktur** angemessen zu sein. Die lineare Struktur bestimmt die Reihenfolge, in der die Inhalte durch die Lernenden kognitiv verarbeitet werden, und erleichtert so den Aufbau einer kohärenten Wissensrepräsentation. Die Lernenden müssen die Reihenfolge der Verarbeitung also nicht selbst organisieren, wodurch die *äußere kognitive Belastung* verringert wird. Auf diese Weise können Ressourcen für eine tiefere Informationsverarbeitung frei werden. Die Textseiten stellen die einzige Verzweigung in der Navigation dar (Abbildung 7-1), ansonsten kann man linear, nach vorne oder zurück navigieren.

Das Lernprogramm erlaubt den Schülern weiterhin ein **individuelles Lerntempo** (Interaktivitätsstufe I, Abschnitt 1.1), womit wiederum die *intrinsische kognitive Belastung* verringert werden kann (Abschnitt 1.4; s. auch Tergan, 2002, S.108f).

Die äußere kognitive Belastung wird mit der Anwendung der Prinzipien des Multimedialernens weiter verringert (Abschnitt 1.3). Durch Umsetzung des Multimedialernensprinzips ist das Lernprogramm in Anlehnung an Comenius zu einer Art zeitgenössischem „Orbis pictus“ geworden (Abbildung 7-2). Die bisherigen Studien mit dem Lernprogramm haben einen Multimediaeffekt gezeigt (Gymnasium, Klasse 7, N=11 bzw. Klasse 8, N=12; Starauschek, 2006c, S.404), der in fachdidaktischen Untersuchungen nicht zwangsläufig auftritt und von der Dar-

stellung der Bilder abhängig ist (Hüllen & Sumfleth, 2004; Galmbacher et al., 2005; Neuroth & Sumfleth, 2005).

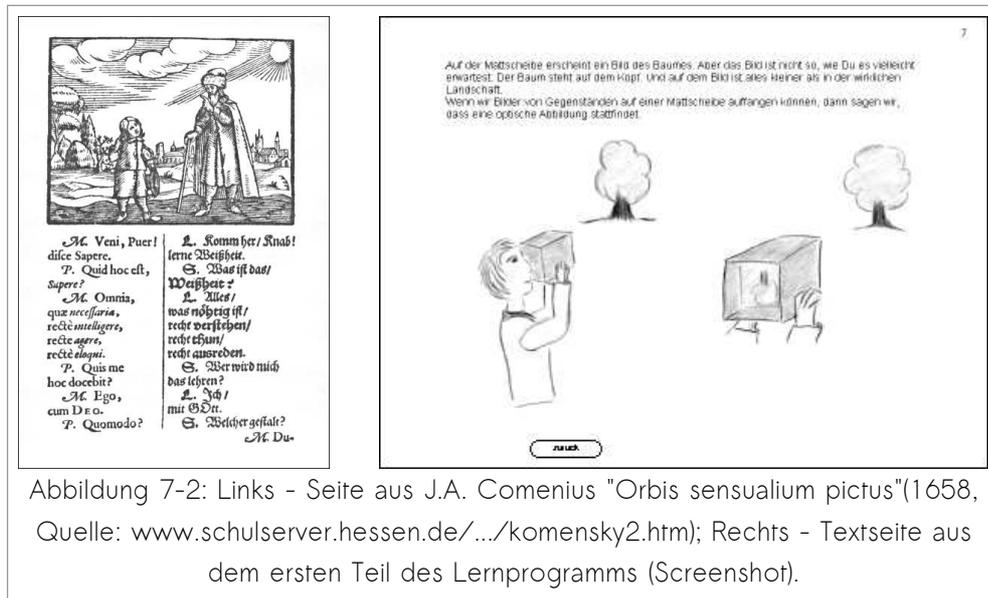


Abbildung 7-2: Links - Seite aus J.A. Comenius "Orbis sensualium pictus"(1658, Quelle: www.schulserver.hessen.de/.../komensky2.htm); Rechts - Textseite aus dem ersten Teil des Lernprogramms (Screenshot).

Dem Kohärenzprinzip entsprechend wurde inhaltlich wie auch gestalterisch auf interessantes, aber unwesentliches Material verzichtet. Die Schüler werden nicht unnötig mit externen Repräsentationen belastet. Zu einem Bild oder einer Animation wird der Text nie gleichzeitig sowohl in geschriebener als auch in gesprochener Form dargeboten (Redundanzprinzip). Visuelle Repräsentationen werden von **auditiven Texten** begleitet (Modalitätsprinzip). Dadurch wird der visuelle Kanal der Schüler nicht überlastet. Weitere Vorteile des auditiven Textes finden sich bei Weidenmann (2002, S.53f): Ein auditiver Text ist einprägsam, weckt Aufmerksamkeit und wirkt persönlicher als gedruckte Sprache. Er verhindert eine Aufmerksamkeitspaltung zwischen Text und Bild; steuert die Blickbewegung und das Tempo der Bildbetrachtung; erhöht die Bildbetrachtungszeit und wird als weniger anstrengend erlebt. Einem möglichen nachteiligen Effekt von auditivem Text, der „Text-Bild-Schere“, wird vorgebeugt, indem der Ablauf der Animationen mit dem gesprochenen Text synchronisiert ist (zeitliche Kontiguität). Nach dem Anhören besteht die Möglichkeit den Text auch in geschriebener Form aufzurufen, damit die Schüler den Text auch zeitlich selbstgesteuert verarbeiten können (Schnotz, 2002a, S.70). In der Studie von Pyter (1994) erwies sich diese bimodale Darbietung des Textes als weniger anstrengend und verständlicher als eine Form, die sich auf die visuelle Repräsentation des Textes beschränkte. Text und Bild bzw. Animation liegen weiterhin eng beieinander, sodass eine räumliche Kontiguität hergestellt ist. Durch die Anwendung dieser Prinzipien wirkt das Lernprogramm im Vergleich zu bestehenden Programmen sehr einfach, geradezu minimalistisch, was unseren Absichten entspricht.

7.4 Visuelle Gestaltung

Das Lernprogramm wurde für die Forschungszwecke in zwei Versionen entwickelt: eine Bildversion mit ausschließlich statischen Bildern, und eine Animationsversion, die neben den statischen auch dynamische Visualisierungen beinhaltet. Die folgende Tabelle 7-2 gibt eine Zusammenfassung über den Anteil von Text, Bild und Animation im Lernprogramm:

	Version des Lernprogramms	Anzahl und prozentualer Anteil der Elemente des Lernprogramms		
		Text	Bild	Animation
1. Teil	Bild	40	34 (85,0%)	-
	Animation	(100%)	19 (47,5%)	16 (40,0%)
2. Teil	Bild	32	26 (81,3%)	-
	Animation	(100%)	9 (28,1%)	18 (56,3%)

Tabelle 7-2: Anteil von Visualisierungen in unterschiedlichen Versionen des Lernprogramms. Die prozentualen Angaben beziehen sich auf die Gesamtanzahl von Einheiten (40 \approx 100% bzw. 32 \approx 100%).

7.4.1 Umsetzung der Prinzipien der Bildgestaltung

Als Bildmaterial kommen im Lernprogramm sowohl Handzeichnungen als auch Fotos zum Einsatz. Die Gestaltung der Bilder verlief vor dem Hintergrund ihrer kognitiven Verarbeitung (Abschnitt 1.2). Weiterhin wurden die „Prinzipien der Bildgestaltung“ (Kapitel 2) so weit verfolgt, wie es mit den inhaltlichen Intentionen und dem Rahmen der Untersuchung vereinbar war. In diesem Abschnitt soll die Umsetzung der Gestaltungsprinzipien vorgestellt werden. In Anlehnung an Ballstaedt (1997, S.203) wurden *kolorierte, einfache, gegenständliche Abbilder* angefertigt.

Fachdidaktisch angemessene Gestaltung

Von den fachdidaktischen Rahmenbedingungen (Abschnitt 8.4, 8.5) ergeben sich folgende Gestaltungsmerkmale:

- Die **Bekanntheit der Bildelemente** ist ein zentrales Gestaltungsprinzip, um lernendengerecht vorzugehen (Abschnitt 2.4). Dazu wurde in den Darstellungen vor allem auf *Alltagsgegenstände* zurückgegriffen. Tischlampe, Glühlampe und Kerze werden als Lichtquelle verwendet, Butterbrot- oder Pergamentpapier dienen als Mattscheibe, eine Pappe mit kleinem Loch wird zur Blende und ein Schuhkarton oder sogar ein dunkles Zimmer werden zur Lochkamera. Diese Gegenstände sind den Schülern visuell bekannt, lediglich ihre neue und ungewohnte Anordnung vermittelt eine neue Information. Bei der phänomenologischen Darstellung der Bildentstehung mit Hilfe der Lochkamera (I/S.6-9) wurde ein bilateral sym-

metrischer Gegenstand (Baum) gewählt. Die Umkehrung des Bildes von oben und unten ist hier leicht erkennbar. Wegen des bilateral symmetrischen Gegenstandes ist jedoch die rechts-links-Umkehrung nicht zu erkennen. Dies entspricht unserer Absicht: Die rechts-links-Umkehrung wird als Transferleistung im Wissenstest abgefragt.

- Bei der gestalterischen Umsetzung der **Einfachheit** wurden drei Punkte beachtet:

1. Dem Leitprinzip entsprechend („Beschränkung auf das Wesentliche“, Abschnitt 2.3) wurden nur die dominanten Elemente des Bildthemas gezeichnet. Der Hintergrund wurde einfarbig realisiert (schwarz oder weiß). Das Auftauchen



eines neues Bildelements ist immer durch eine neue Information bedingt. Auf visuelle Effekte, die der Informationsvermittlung nicht dienen, wurde verzichtet. 2. Um Unregelmäßigkeit zu veranschaulichen, reicht es, die Regel zu brechen: zwei dünne Lichtbündel in der Abbildung 7-3a sind absichtlich nicht radial eingezeichnet. 3. Es werden nur dort mehr als sieben Bildelemente verwendet („chaotisch zeichnen“), wo es physikalisch Sinn macht (Abbildung 7-3b).

- Im ersten Teil des Lernprogramms taucht mehrmals eine **Identifikationsfigur** im Alter der Schüler auf. Die Person wurde geschlechtsunspezifisch gezeichnet, damit sowohl Mädchen als auch Jungen sie als Identifikationsfigur akzeptieren können. Der Anlass für die Einführung dieser Figur in Verbindung mit dem Text ergibt sich aus dem Ziel, die Lernenden in das Geschehen des Lernprogramms einzubeziehen, etwa durch Sätze wie „Jetzt kannst du den Kasten in die Hand nehmen ...“ (I/S.6). Die Figur zeigt wie die Handlungen durchgeführt werden sollen, liefert aber keine Erklärungen. Indem die Rolle der Figur darauf beschränkt wurde, Handhabungen zu zeigen, wird der Gefahr begegnet, die Aufmerksamkeit der Schüler übermäßig auf sich zu lenken. Die Figur ist deshalb farblos und ohne Schattierungen gezeichnet, damit die Aufmerksamkeit nicht von dem Lernmaterial abgelenkt wird. Einzig die Augen werden vergrößert und mit deutlichem Kontrast gezeichnet, weil es sich implizit auch um das Sehen handelt (I/S.22, 25).
- Ein **enger Text-Bild-Bezug** ist nicht ausschließlich fachdidaktischen Faktoren zuzuordnen. Die inhaltliche Verbindung von Text und Bild hat auch eine lernpsychologische Bedeutung. Im Lernprogramm sind zwei Arten der inhaltlichen Beziehung zwischen Text und Bild vertreten:
 - (1) Kongruenz, d.h. Bild und Text übermitteln nahezu dasselbe, wobei ein Bild auch im Fal-

le dieser inhaltlichen Beziehung mehr Information über sichtbare Merkmale und räumliche Beziehungen transportiert als die sprachliche Beschreibung (I/S.19, 33). Deswegen kann man hier nicht von strenger Kongruenz im Sinne Ballstaedts (1997, S.252) oder Redundanz im Sinne Weidenmanns (1994, S.524) sprechen.

(2) Komplementarität, d.h. die Informationen von Bild und Text ergänzen einander. Der Text präzisiert, was das Bild zeigt (I/S.18), oder er enthält mehr Information als das Bild (II/S.14). Das Bild zeigt an einem konkreten Gegenstand, was der Text nur anspricht (I/S.11), oder es veranlasst zum Vergleichen (II/S.12). Eine komplementäre inhaltliche Beziehung unterstützt die integrative Verarbeitung von Text und Bild, weil zum Gesamtverständnis beide Repräsentationen erforderlich sind (Ballstaedt, 1997, S.252).

Die Platzierung des Bildes im Lernmaterial kann sich auch auf die Aufmerksamkeit(sverteilung) der Schüler auswirken. Das Bild wird zuerst ohne geschriebenem Text dargestellt. Auf der Textseite des Lernprogramms wird wiederum eine Vertikalverteilung von Text und Bild gewählt. Der Text ist oben, der Blick fällt zuerst auf ihn, dadurch gehört ihm in diesem Fall die Leitfunktion (Ballstaedt, 1997, S.251). Im Lernprogramm werden keine alphanumerische Ergänzungen (Bildtitel, Beschriftung, Legende) eingesetzt. Sie hätten zwar einen zusätzlichen positiven Einfluss auf den Wissenserwerb (Ballstaedt, 1997, S.249), die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist jedoch die Lernwirkung von Visualisierungen in sich zu untersuchen. In der Studie werden deshalb unbeschriftete Bilder mit unbeschrifteten Animationen verglichen.

- Die Informationsdichte wurde im Lernprogramm durch sequentielle Strukturierung des Lerninhalts verringert, insofern besteht kein Komplexitätsproblem für die Visualisierungen. Jedes Bild besteht aus höchstens **sieben optischen Gruppen** (Abbildung 7-4, Kapitel 2), so wird der Empfehlung von Ballstaedt (1997, S.228) Rechnung getragen. Eine Ausnahme bildet lediglich ein Bild des Lernprogramms (II/S.25f), für das eigens ein größeres Format gewählt wurde. Damit verteilen sich die überzähligen Bildelemente auf einer größeren Fläche.



Abbildung 7-4: Optische Gruppen (I/S.37).

- Im Lernprogramm werden fast ausschließlich **Handzeichnungen** eingesetzt. Sie bedienen sich eines Stils, wie er aus Comics oder Kinderbüchern bekannt ist und stehen im absichtsvollen Gegensatz zu fotorealistischen Darstellungen bzw. Computergrafiken, die eher die Gefahr mit sich bringen, die Aufmerksamkeit des Betrachters auf irrelevante Details zu lenken. Mit den Handzeichnungen sollen die Schüler weiterhin mehr zu eigenen Ideen angeregt werden. Die Zeigefunktion von Bildern wird leichter durch einfache Zeichnungen als durch realistische Abbildungen erfüllt. Die wichtigsten Inhalte werden visuell hervorgehoben. Bei den meist komplexen Bildern mit Konstruktionsfunktion wird auf die Optimierung der Komplexität (Abschnitt 2.3) und auf die sprachliche Unterstützung geachtet (Weidenmann, 2002, S.93).

Lernpsychologisch angemessene Gestaltung

Der wichtigste Anspruch an Bilder aus lernpsychologischer Sicht ist die **Einfachheit** (Abschnitt 2.3). Durch die Vereinfachung wird ein bestimmter Grad an Abstraktheit erreicht, was den Aufbau von mentalen Modellen unterstützen kann, außerdem wird dadurch die äußere kognitive Belastung geringer. Da die Umsetzung der Einfachheit im vorigen Abschnitt ausgeführt wurde, sollen hier weitere Gestaltungsmerkmale vertieft werden:

- Die gleichen Gegenstände und ihre Anordnungen erscheinen in gleichbleibenden Farben und Formen (**konsistente Gestaltung**). Wenn ein neues Objekt in die Darstellung eingeführt wird, bleiben bereits bekannte Objekte und ihre Anordnung zunächst unverändert (I/S.11, 28f, 33-36). Eine Veränderung der Darstellung erfolgt nur, wenn eine neue Information dies erfordert.
- In den Bildern werden **Farbcodes** definiert und durchgängig eingehalten: die Mattscheibe ist stets blau, das Licht gelb, die Lochblende schwarz, u.s.w. Eine Ausnahme bilden die Kerzenflamme und die Kerze (Abbildung 7-3, 7-4). Sie werden der Erklärungsfunktion entsprechend anders dargestellt. Die optische Abbildung wird im ersten Teil des Lernprogramms mit Hilfe von unterschiedlichen Farben der Kerzenflamme (blau, gelb, rot) erklärt. Ein farbiger Kerzenstumpf würde dabei die Aufmerksamkeit der Lernenden ablenken, deswegen bleibt seine Farbe zunächst weiß. Demgegenüber liegt im zweiten Teil des Lernprogramms der thematische Schwerpunkt unter anderem auf der Streuung. Um dies sachgerecht zu visualisieren, ist es wichtig, dass das Licht (gelb) am Kerzenstumpf (rot) in der Darstellung seinen Farbeindruck wechselt (II/S. 25f). Eine Farbänderung vom Gelb zum Weiß wäre gestalterisch schwer zu realisieren, daher wurde für die Farbe des Kerzenstumpfs im zweiten Teil des Lernprogramms rot gewählt. Da rot weiterhin auch als Signalfarbe gilt, eignet sie sich zum Hervorheben. So kann die Streuung in den Mittelpunkt der Aufmerksamkeit der Schüler gelangen. Eine farbige Flamme würde dabei die Aufmerksamkeit der Lernenden ablenken, deswegen ist sie dem Farbcode für *Licht* entsprechend gelb. Bei den Visualisierungen wurden insgesamt **sechs Farben** verwendet (gelb, rot, grün, blau, braun, schwarz). In einem Bild werden maximal fünf Farben eingesetzt. Diese Anzahl liegt weit unter den von der Ergonomieforschung angegebenen acht bis zehn Reizstufen, aber auch unterhalb der von Ballstaedt angegebenen maximalen Anzahl von fünf bis sieben Farbcodes (Abschnitt 2.3).

Die **Steuerung der Aufmerksamkeit** erfolgt mit den folgenden Mitteln:

- Durch die farbige Darstellung wird ein bestimmter Anregungsgehalt gesichert. Im Lernprogramm werden keine weiteren spezifischen Mittel zur Steuerung der **Blickzuwendung** gewählt, weil sie mit dem Lerninhalt nicht im Einklang wären bzw. den Inhalt nicht unterstützen würden.
- Die plastische, dreidimensionale Darstellung von räumlichen Anordnungen und Gegenständen zieht bereits den Blick des Betrachters an. Als direktes Mittel des **visuellen Hervorhebens** wurden Umrahmungen benutzt (I/S.14, 27). Weiterhin wurde für die Konturen der relevanten Objekte (I/S.31) und für dünnen Lichtbündel (I/S.32, 34, II/S.25) die empfindliche

Strichstärke verwendet (ca. 1 mm, Abschnitt 2.3). Eine bewusste Wahl der relativen Größen der Objekten dient als indirektes Mittel des visuellen Hervorhebens: wichtige Objekte sind vergrößert dargestellt (z.B. die Kerze in I/S.24). Wenn zwei Gegenstände für die optische Abbildung gleich wichtig sind, werden sie auch gleich groß gezeichnet (Lochblende und Mattscheibe in I/S.31, Kerze, Linse, und Mattscheibe in II/S.19). Die zentralen Inhalte wurden in der Bildmitte platziert. Eine natürliche Umrahmung schafft zusätzlich der schwarze Hintergrund der Bilder auf weißem Grund (I/S.33-37, II/S.6, 28). Ein Rahmen wurde auch indirekt durch das abgeschnittene dünne Lichtbündel geschaffen (I/S.22; II/S.23, 24): Die Lichtbündel werden nicht bis zum Rand des Lernprogramms gezeichnet. Das entstandene virtuelle Viereck wird dem Gesetz der Geschlossenheit (Abschnitt 2.2) entsprechend wahrgenommen.

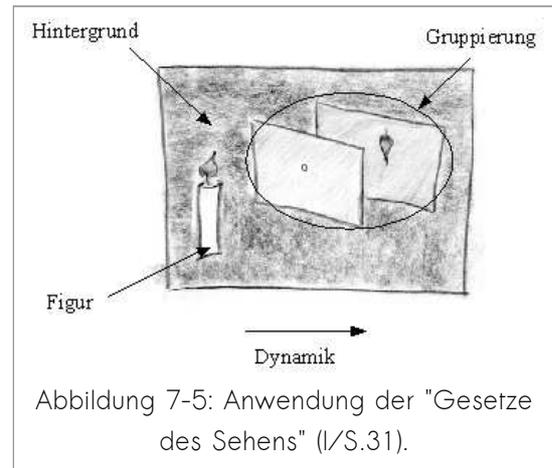
- Um einen **Blickpfad** anzulegen, wird im Lernprogramm vorwiegend eine indirekte Methode gewählt. Dazu werden die Gegenstände auf der Diagonalen von links unten nach rechts oben platziert. Direkte Mittel der Steuerung werden sparsam verwendet. Um bestimmte Elemente des Bildes dynamisch darzustellen und damit hoffentlich auch die Elemente des mentalen Modells zu bewegen (Weidenmann, 2002, S.88), werden Hinweis Pfeile für die Richtung der Lichtausbreitung (I/S.11, 14) und Bewegungspfeile eingesetzt (I/S.9, II/S.28f).
- Zwei Bilder mit ähnlichen Inhalten werden in gleich großem Format nebeneinander platziert, um zum **Vergleich** anzuregen (I/S.11, II/S.9, 12). Im zweiten Teil des Lernprogramms werden zu diesem Zweck auch Fotos in Verbindung mit Zeichnungen eingesetzt (II/S.4, 19, 28). Die parallele Darstellung von realitätsnahen und abstrakten Bildern erleichtert für die Schüler die Anknüpfung an die Realität (Abschnitt 1.4).
- Zur **Erhaltung von Aufmerksamkeit** tragen die Einfachheit, Farbigkeit und optimierte Komplexität der Bilder bei (siehe oben). Weiterhin ist der inhaltliche Ablauf des Lernprogramms abwechslungsreich (Tabelle 7-1). Es werden unterschiedlich lange Texte verwendet, wodurch der zeitlicher Ablauf des Hörtextes ebenfalls unterschiedlich ist. Hinzu kommt, dass auch mal Seiten ohne Bilder eingesetzt werden (*advanced organizer*, Abschnitt 7.2).

Wahrnehmungspsychologisch angemessene Gestaltung

Für das Verstehen wesentliche physikalische Sachverhalte werden **prägnant** dargestellt. Diese Prägnanz wird über die Anwendung der „Gesetze des Sehens“ (Abschnitt 2.2) gewährleistet. An einem Beispiel (Abbildung 7-5) soll dazu das Vorgehen veranschaulicht werden:

- Die Figuren, in diesem Fall die Kerze, die Pappe mit dem Loch und die Mattscheibe, müssen sich von dem Hintergrund abheben. Der schwarze Hintergrund erleichtert ihre Wahrnehmung.
- Die Prägnanz der Figuren wird durch Einfachheit, durch bekannte geometrische Formen (Viereck, Kreis), durch ihre Geschlossenheit und Symmetrie unterstützt.

- Im Einklang mit dem „Gesetz der Dynamik von links nach rechts“ ist die Kausalitätskette in der Zeichnung dargestellt: Ganz am linken Rand ist die Kerzenflamme gezeichnet, mittig folgt die Lochblende, mit der ihr Bild auf der Mattscheibe (rechts) erzeugt wird. Die Bildelemente sind ferner auf einer gedachten diagonalen Linie platziert.
- Durch die Nähe und Ähnlichkeit werden Gegenstände gruppiert. So empfindet man die viereckige Lochblende und die viereckige Mattscheibe als zusammengehörig. Das entspricht unserer Botschaft: Sie sind die Hauptbestandteile einer Lochkamera. Sie funktionieren in einem dunklen Zimmer als Lochkamera auch ohne Schachtel oder Kasten.



7.4.2 Grafische Gestaltung von Animationen

Animationen bestehen aus einer dynamischen Reihenfolge von Standbildern. Diese Bilder wurden in der vorliegenden Arbeit theoriegeleitet gestaltet und durch Interviews validiert (Abschnitt 7.4.1, 7.5). Es ist anzunehmen, dass diese Animationen zusätzlich zur Lernwirksamkeit beitragen (Abschnitt 3.3). Hierin liegt das Erkenntnisinteresse der Untersuchung: Auf Grundlage der optimierten statischen Bilder Animationen zu generieren, die zuverlässig lernförderlich sind. Da die Animationen noch weitere Effekte mit sich bringen als statische Bilder (Abschnitt 3.2), ergeben sich zusätzliche Gestaltungsprinzipien (Abschnitt 3.3), denen Rechnung getragen wird. Die Grundlage für die technische Realisierung der Animationen bilden eingescannte Handzeichnungen. Zur Visualisierung eines Prozesses ist eine Reihe einzelner Standbilder nötig, die den Anfangs- und Endzustand kontinuierlich verbinden. Diese Bildreihen der Animationen des Lernprogramms wurden mit dem Bildbearbeitungsprogramm Paint Shop Pro 4 generiert. Im letzten Schritt wurden die Animationen mit Macromedia Director MX erstellt.

Der Klassifikation nach Lowe (Abschnitt 3.1) entsprechend kann sich die grafische Darstellung der Animationen auf *extrinsische* (Translation, Transition) und *intrinsische* (Transformation) Weise ändern. Im Lernprogramm finden alle grafischen Möglichkeiten Anwendung. So wird zum Beispiel die Mattscheibe in der Lochkamera verschoben (I/S.9, Translation); erscheinen die Lichtbündel stufenweise (I/S.28f, II/S.23f, Transition); wird die Lichtausbreitung durch Vergrößerung einer kreisförmigen Fläche dargestellt (I/S.11f, Transformation). Ein weiteres Beispiel für die Transformation stellt die Animation der dritten Seite dar (I/S.3): Hier können die Schüler durch Überblendung in die Lochkamera hineinschauen. Damit wird einerseits ein möglicherweise fehlender kognitiver Prozess – die Vorstellung des Inneren – visuell kompensiert, andererseits wird die Aufmerksamkeit der Lernenden auf die innere Struktur der Lochkamera gelenkt. Eine weitere Technik, die eingesetzt wird, ist der **Perspektivwechsel**,

d.h. das Gesehene wird von zwei unterschiedlichen Beobachtern in einem Bezugssystem dargestellt. Dies wurde durch einen Zoom-Effekt und Überblendung realisiert. Der **Zoom-Effekt** ist eine filmische Aktivierungsstrategie. In der Werbepsychologie wird dieser Effekt für inhaltlich wichtige Stellen eingesetzt (Weidenmann, 1994, S.537f; Felser, 2001, S.129ff). Beim Zoom-Effekt, wie er im Lernprogramm genutzt wird (I/S.7), verläuft der Perspektivwechsel stufenweise: Ausgehend von der Sicht der Identifikationsfigur wird der Blick der Lernenden auf die optische Abbildung auf der Mattscheibe fokussiert – sie sehen mit den Augen der Identifikationsfigur das Bild in der Lochkamera. Bei der **Überblendung** geschieht eine abrupte Änderung der Perspektive (I/S.22). Dieser plötzliche, klare Wechsel wirkt überraschend auf die Lernenden; deswegen besitzt er auch eine hohe Prägnanz. Die Überblendung wird auch an Stellen eingesetzt (II/S.6f), wo in Abhängigkeit der Blendengröße eine Änderung der Qualität der optischen Abbildung dargestellt werden soll.

Zur Lernwirksamkeit der entwickelten Animationen

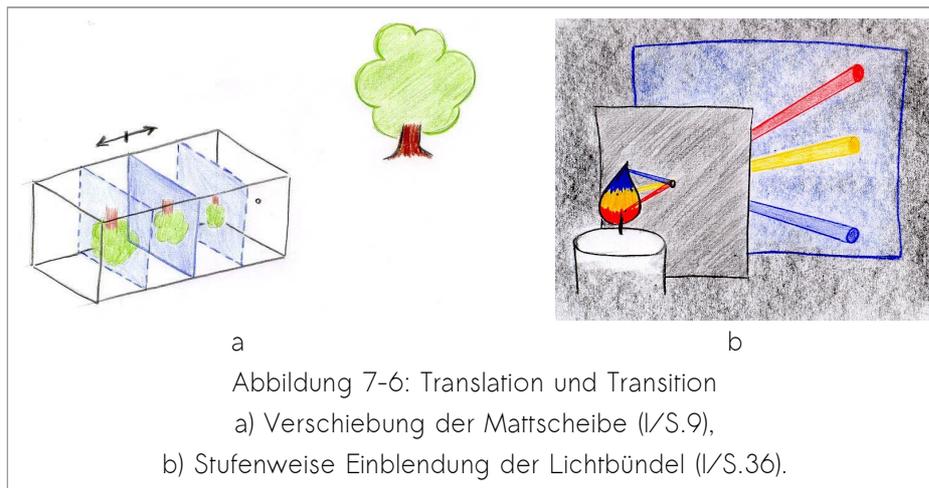
In diesem Abschnitt werden die Animationen inhaltlich gruppiert und ihre möglichen lernpsychologischen Wirkungen diskutiert, die dann als Behaltens- oder Transferleistung messbar sein können (Kapitel 9). Anhand diesen Überlegungen werden *Hypothese 1* und *2* im Abschnitt 8.1 formuliert. Die Tabelle 7-3 soll eine erste Übersicht geben. Die einzelnen Themen werden im Folgenden genauer erläutert.

Inhalt der Animation	Wirkung im kognitiven System	Messbarer Wissenserwerb
Optische Abbildung	Optimierte äußere kognitive Belastung, Sequenzierte Verarbeitung	Physikalische Vorstellung der optischen Abbildung
Lichtausbreitung	Dynamisches mentales Modell	Physikalische Vorstellung der Lichtausbreitung
Physikalischer Sehvorgang	Kausalität, Kognitive Flexibilität	Physikalische Vorstellung des Sehens
Streuung	Dynamisches mentales Modell	Physikalische Vorstellung der Streuung

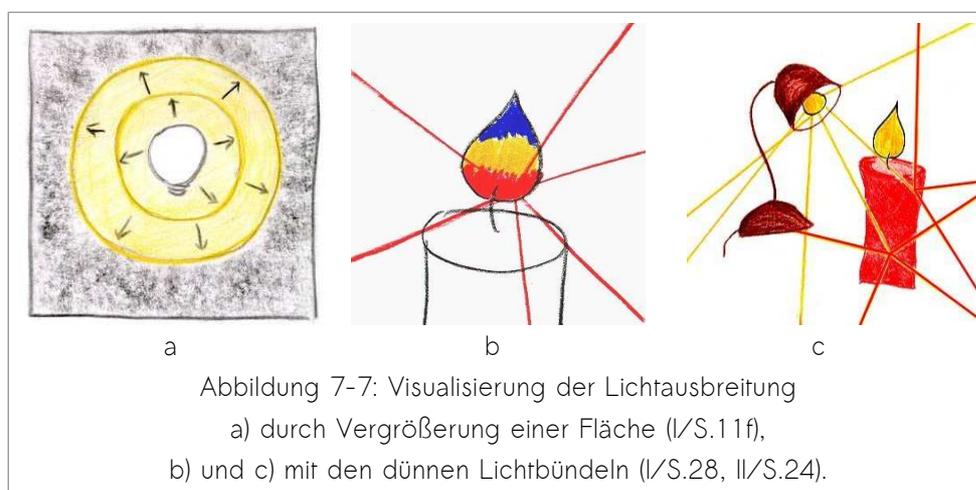
Tabelle 7-3: Die Themen von Animationen aus lernpsychologischer Sicht.

Die Animationen der **optischen Abbildung** visualisieren die Inhalte, die der Text explizit nennt. Als aufmerksamkeitssteuernde dynamische Elemente werden Translationen (I/S.9, II/S.28f, 32; Abbildung 7-6a), Transitionen (I/S.14f, 22, 36f, II/S.5ff, 10, 15, 20, 25f, 30f; Abbildung 7-6b) und Transformationen (I/S.3, 7, 23, 33, 36; II/S.4, 8f, 25f, 31) genutzt. Die Aufmerksamkeit der Schüler richtet sich auf das bewegte Bildelement. Die Steuerung der Aufmerksamkeit erfolgt deshalb auf der visuellen Ebene so, dass nur ein Sachverhalt zur gleichen

Zeit dynamisch dargestellt wird. Damit ist die Menge der zu verarbeitenden Information bestimmt und die Schüler sind nicht von mehreren sich gleichzeitig bewegenden Bildelementen überfordert. Die einzelnen Abschnitte einer Animation bauen dem Text folgend aufeinander auf und sind damit auch auf der Ebene der Visualisationen inhaltlich sequenziert. Dies bringt, so darf man annehmen, für das kognitive System der Lernenden eine reduzierte äußere kognitive Belastung mit sich. Aufgrund der gewonnenen zusätzlichen freien Kapazität kann man annehmen, dass der Lernende zu einer besseren Behaltensleistung befähigt wird (Abschnitt 3.2).



Der Prozess der **Lichtausbreitung** wird zwar im Text explizit nur zweimal thematisiert (I/S.11f), bestimmte Verben des Textes heben jedoch öfters den dynamischen Charakter des Lichtes hervor. (Das Licht „breitet sich aus/ bewegt sich/ fällt“; die dünne Lichtbündel „gehen aus/ passieren/ kommen/ gelangen auf die Mattscheibe“.) In den statischen Bildern des Lernprogramms symbolisieren die Pfeile die Ausbreitung des Lichtes. Die Animationen zeigen wiederum unmittelbar die Lichtausbreitung. Die Visualisierung erfolgt einerseits in Anlehnung an das Flüssigkeitsmodell des Lichtes (Abschnitt 6.2), das durch die Vergrößerung einer kreisförmigen Fläche realisiert wird (Abbildung 7-7a; I/S.11-14). Andererseits wird die Lichtausbreitung im Modell der dünnen Lichtbündel dargestellt, die sich stufenweise ausbreiten



(Abbildung 7-7b; I/S.28f; II/S. 9, 23). Die **Streuung** des Lichtes an einem Kerzenstumpf wird ebenfalls in seiner Ausbreitung visualisiert (Abbildung 7-7c; II/S.24-26). Der Prozesscharakter der Ausbreitung des Lichts und seiner Wechselwirkung mit Gegenständen wird auf der visuellen Ebene hauptsächlich mit Hilfe von Animationen dargeboten (Tabelle 7-4).

Die kognitionspsychologischen Befunde aus Abschnitt 3.2 rechtfertigen die Erwartung, dass durch diese unmittelbare Darstellung die entsprechenden dynamischen mentalen Modellen entwickelt werden (Abschnitt 3.2): Die Lernenden können die physikalische Vorstellung der Lichtausbreitung und der Streuung erwerben.

	1. Teil des Lernprogramms		2. Teil des Lernprogramms		
	Einheiten	Σ_1	Einheiten	Σ_2	Σ_{1+2}
Animationsversion	Text 11f, 14, 21-25, 27f, 32f, 35f, 38, 40	16	Text 3, 7, 20, 22f, 24f	7	23
	Bild 14f, 27	3	Bild -	0	3
	Animation Flüssigkeitsmodell des Lichtes (11-14)	4	Animation Dünne Lichtbündel (9, 23-26, 31)	6	16
	Dünne Lichtbündel (24f, 28f, 32f)	6			
Bildversion	Text 11f, 14, 21-25, 27f, 32f, 35f, 38, 40	16	Text 3, 7, 20, 22f, 24f	7	23
	Bild 11f, 14f, 27	5	Bild -	0	5

Tabelle 7-4: Lichtausbreitung in Texten, Bildern und Animationen in unterschiedlichen Lernprogrammversionen (Σ_1 , Σ_2 , Σ_{1+2} – Summe der Einheiten im ersten, zweiten und beiden Teilen des Lernprogramms).

Im Lernprogramm werden auch Schüler- vorstellungen zum **Sehvorgang** berücksichtigt. Der Sehvorgang ist zwar im Text nicht explizit beschrieben, er wird jedoch implizit auf der Visualisierungsebene vermittelt. Technisch wird der physikalische Sehvorgang mit der parallelen Darstellung von zwei Perspektiven realisiert (Abbildung 7-8; I/S.25). In der einen Perspektive (rechts) wird der physikalische Sehvorgang dargestellt, wie er für einen äußeren Beobachter im Lichtbündelmodell erscheinen könnte. Die zweite Perspektive (links) zeigt den Eindruck, der, bei entsprechender Verlangsamung

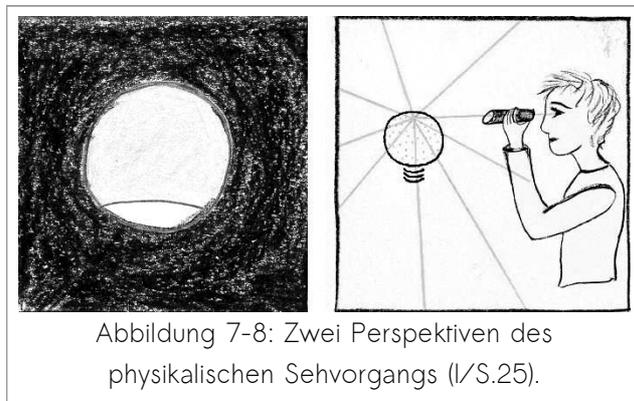


Abbildung 7-8: Zwei Perspektiven des physikalischen Sehvorgangs (I/S.25).

der Lichtausbreitung, einem subjektiven Beobachter, hier der Identifikationsfigur möglich wäre. Durch Veranschaulichung des Prozesses wird versucht den Fehlvorstellungen zum Sehen entgegen zu wirken. Die dynamische Darstellung der Animation legt wegen ihres zeitlichen Ablaufes einen kausalen Zusammenhang nahe („erklärende Funktion“, Abschnitt 3.2): Wenn die Lichtbündel ins Auge fallen, dann sieht man ein Objekt.

Die Animationen werden im nächsten Schritt anhand des Interviews validiert (Abschnitt 7.5), und erst die daraufhin optimierten Animationen werden im Lernprogramm eingesetzt.

7.5 Qualitative Studien zur Optimierung der Grafik

Die Effektivität der Bilder ergibt sich erst aus der Interaktion zwischen dem Betrachter und der Darstellung. Heißt das, dass optimal gestaltete Bilder auch optimal genutzt werden und damit auch optimal wirken? Bestimmt nicht. Visualisierungen stellen nur ein Angebot dar, es hängt von dem Lernenden ab, wie er damit umgeht. Es gilt aber sicherzustellen, dass die Schüler mit den verwendeten Darstellungscodes umgehen können und die beabsichtigte Botschaft der Bildinhalte erkannt wird. Aus diesem Grund wurden zwei Vorstudien zur Bild- und Animationsversion des Lernprogramms durchgeführt, anhand derer die theoriegeleitet gestaltete Grafik validiert werden konnte.

Begründung der Methodenwahl

Bei der Wahl der Methode wurden quantitative und qualitative Verfahren bzgl. des Erkenntnisinteresses der Vorstudie miteinander abgewogen. Das Verfahren soll Verständnisschwierigkeiten der Visualisierungen und Bedienungsprobleme des Lernprogramms aufdecken und eine allgemeine Bewertung des Lernprogramms erfragen. Im Hintergrund der Vorstudie steht also das Forschungsinteresse: Was nehmen die Schüler wahr und wie gehen sie damit um? Da man diese Details noch nicht weiß und auch nicht wissen kann, liegen keine Ergebnisse, keine gesicherte Vermutungen zu diesem spezifischen Lernprogramm vor. Damit hat man keine Grundlage für den Einsatz eines Fragebogens. Ein quantitatives Verfahren ist also keine Alternative für die Vorstudie.

Das heranzuziehende Verfahren muss offen sein für Befunde, die man nicht vorhersehen kann. Diese explorative Funktion erfüllt ein qualitatives, sprachlich basiertes Erhebungsverfahren, das Interview, am besten. Die Antworten der Schüler werden als eigenständige Äußerungen ausgewertet und nicht in die Form von vorgegebenen Antwortalternativen eines Fragebogens übertragen. Da es sich in dieser Vorstudie um einen konkreten Gegenstand handelt (Lernen mit dem Lernprogramm) und erst darauf aufbauend die subjektiven Lernerfahrungen der Schüler erfragt werden, kann das eingesetzte Verfahren als fokussiertes Interview eingeordnet werden (Friebertshäuser, 1997, S.378). In der Terminologie von Mayring (2002, S.66ff) kann man diese Methode als ein offenes und halb- bzw. unstrukturiertes Interview einordnen:

- offen, weil es die Schüler möglichst frei zu Wort kommen lässt,

- halb- bzw. unstrukturiert, weil die zentralen Aspekte des Themas von der Interviewleiterin vorher erarbeitet werden, anhand derer ein **Interviewleitfaden** entsteht (Anhang C.2). Im Leitfaden wird in Bezug auf einzelne Themen eine Hierarchie von Fragen aufgestellt (Haupt-, Neben- und Nachfrage). Der Leitfaden ergibt lediglich ein Gerüst für das Interview, die Reihenfolge und Formulierung der Fragen darf variiert werden. Diese teilweise Standardisierung erleichtert dann in der Auswertung die Vergleichbarkeit verschiedener Interviews.

In der Frage, wann man mit der Suche nach Einzelbefunden bzw. mit der Anwendung des explorativen Verfahrens aufhört, wird in ähnlicher Weise vorgegangen, wie es zum Beispiel in der Methode der *Grounded Theory* geschieht (Strübing, 2008, S.33): Dort sucht man nach Einzelbefunden, die zu einer Theoriebildung beitragen können. Wenn man keine neuen Einzelheiten mehr findet (*theoretische Sättigung*), hat man alles beisammen, was man für die Theorie braucht. In der Vorstudie wird zwar nicht nach einer Theorie für die Wirkung des Lernprogramms gesucht, denn diese Theorie gibt es schon (Kapitel 1 bis 3). Es wird aber nach einem Überblick über mögliche Probleme gesucht, und dieser Überblick kann durch eine Sammlung von Einzelbefunden gewährt werden. In dieser Hinsicht, der Suche nach einem Spektrum aussagekräftiger Einzelbefunde, gibt es also eine Ähnlichkeit zwischen dem hier angewendeten Verfahren und dem der *Grounded Theory*.

Diese Vorgehensweise ist wegen ihres klaren Kriteriums (Informationssättigung) leicht umsetzbar, und hat den Vorteil, dass die Anzahl der Probanden begrenzt sein wird. Da die Interviews der Vorstudie mit einer begrenzten, wahrscheinlich kleinen Stichprobe durchgeführt werden, verliert die Kritik an dem Interviewverfahren (es sind nur kleine Stichproben erlaubt) an Bedeutung. Die Stichprobe wird nicht durch die Voraussetzung des Interviews, sondern wegen der Informationssättigung beschränkt sein.

Der Ablauf der Vorstudie

In der Vorstudie wird anhand des Interviewleitfadens schrittweise und kontrolliert vorgegangen. Die Probanden erhalten am Anfang der Sitzung eine Anleitung zur Vorstudie (Anhang C.1). Das Lernen findet am Computer statt. Das Interview wird mit Hilfe einer Tonbandaufzeichnung festgehalten. Für die Aufzeichnung wird das Einverständnis der Schüler eingeholt. Die Fragen der Tonprobe (**Leitfaden 1.0**) sind aufwärmende *Sondierungsfragen*. Sie senken die Hemmschwelle bei den Probanden und schaffen einen Einstieg in das Thema. Ferner liefern sie Personendaten und Informationen über die Einstellungen zum Schulfach Physik und zur Computernutzung.

Nach dieser einführenden Phase arbeiten die Probanden mit der Text-Bild- bzw. Text-Animation-Version des Lernprogramms (erste bzw. zweite Vorstudie). Nach jeder Seite des Lernprogramms werden *unstrukturierte Fragen* (**Leitfaden 1.1**) in Form von Bild- bzw. Animationsbeschreibungen gestellt („Was siehst Du auf dem Bild bzw. in der Animation?“). Hier wird versucht, auch einen Text-Visualisierung-Bezug herzustellen („Was siehst Du auf dem Bild bzw. in der Animation, was Du im Text nicht findest?“). Diese Fragen sind so offen formuliert, dass die Schüler ihre Wahrnehmung möglichst unbeeinflusst erzählen können.

Zu ausgewählten Bildern des ersten Teils des Lernprogramms werden die Probanden konkret befragt (**Leitfaden 1.2**). Diese Visualisierungen werden im Vorfeld des Interviews in mehreren Alternativversionen angefertigt. Die Antwort bzw. die Bildbeschreibung der Probanden entscheidet, welche Bilder in der letztgültigen Form des Lernprogramms verwendet werden.

Die Bewertung des Lernprogramms (**Leitfaden 2**) wird mit *halbstrukturierten Fragen* erkundet, bei denen ein konkreter Aspekt des Lernprogramms vorgegeben wird, um dann nach Sichtweisen und Empfinden zu fragen. Die Fragen haben keinen rein explorativen Charakter, weil bereits vorliegende Untersuchungen, die den Multimediaeinsatz in der physikalischen Bildung evaluieren, in die Entwicklung des Leitfadens 2 einfließen (Petri, 2001; Zastrow, 2001; Eckert et al., 2003; Suhr, 2003). Es werden auch redundante Fragen gestellt, die dieselben Inhalte mit unterschiedlichen Formulierung wiederholt abfragen, um eine eindeutige Antwort von den Schülern zu bekommen.

Einstellung und Verhalten der Interviewleiterin

Das Ergebnis der Erhebung hängt ganz entscheidend von der Mitwirkung der Schüler ab. Der Interviewer übt weiterhin durch nonverbale und verbale Reaktionen auf die Äußerungen des Befragten einen Einfluss aus (*Interviewereffekt*, Friebertshäuser, 1997, S.371). Deshalb reicht es für ein gelungenes Interview nicht aus, lediglich die konzipierten Fragen zu stellen. Es soll durch das Verhalten der Interviewer ein echtes Interesse und daraus folgend ein **echtes Zuhören** kommuniziert werden. Erst dann fühlen sich die Schüler ernst genommen und in ihrer Meinung tatsächlich gefragt. Da die Interviewerin identisch mit der Autorin ist, ist die Voraussetzung eines inhaltlichen und menschlichen Interesses des Interviewers in dieser Vorstudie weitgehend erfüllt. Das Zuhören wird im Verlauf des Interviews mit folgenden Verhaltensweisen unterstützt:

- Die Interviewerin bleibt im Hintergrund und verhält sich ganz zurückhaltend (*passives Zuhören*). Sie gibt den Probanden immer genug Zeit für die Antwort und lässt sie ausreden. Sie muss also Geduld üben und warten können.
- Sie bleibt *neutral* und signalisiert mit Füllwörtern („Hm“, „Aha“), dass sie zuhört. Sie äußert sich auf keinem Fall wertend oder lenkend. Sie darf auch keine große Mimik zeigen (z.B. Grinsen), das würde die Schüler möglicherweise verunsichern.
- Die Interviewerin sichert durch Klärung, Neuformulierung und Spiegelung der geäußerten Gedanken ihr angemessenes Verständnis des von den Schülern Geäußerten (*aktives Zuhören*, Gordon, 1998, S.96ff). Diese Kommunikationstechnik hilft auch, Zweideutigkeiten in der nachfolgenden Interpretation der Ergebnisse zu vermeiden.

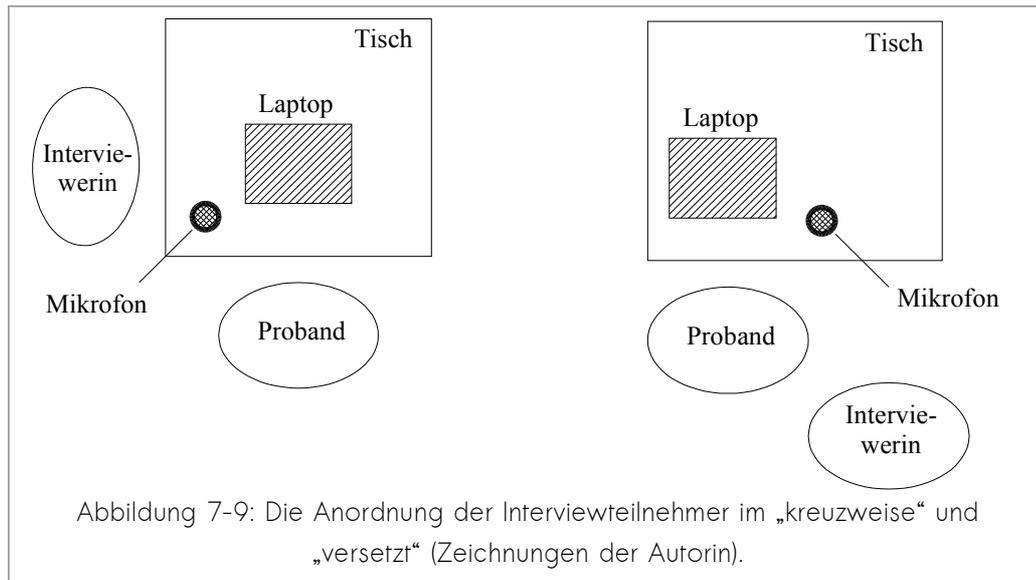
Was für Antworten sind in einem Interview zu erwarten? Das, was die Schüler wirklich denken, mischt sich mit dem, was die Interviewerin durch ihre Fragen induziert; und mit dem, was die Schüler spontan erfinden, damit sie etwas erzählen können. Diesem Verhalten von Probanden wird versucht, mit den **Nachfrage-Strategien** (Hopf et al., 1995, S.26f) entgegenzuwirken. Dabei ist es schwieriger, das Kriterium der Nicht-Beeinflussung der Probanden zu befolgen. Die Fragen könnten von der Interviewerin ungewollt suggestiv formuliert sein, des-

wegen ist hier Vorsicht angebracht. Bei der Frage „Was hat Dir an dem Lernprogramm gefallen bzw. nicht gefallen?“ wird nie „Warum?“ gefragt. Dies könnte die Schüler blockieren. Es könnte sein, dass sie die Begründung nicht wissen oder auf ein Vorwissen zurückgreifen. Dies widerspricht dem Forschungsinteresse, das darauf gerichtet ist, möglichst unbeeinflusst von Wissensbeständen, die aus anderen Zusammenhängen (Eltern, Lehrern, usw.) stammen, zu erfahren, was die Probanden im Moment über das Lernprogramm denken. Dazu sind *Verständnisfragen* geeignet („Wie meinst Du das genauer? Was verstehst Du darunter?“). Sie ermuntern die Schüler zu weiteren Erklärungen. Die Frage etwa „Kannst Du dafür ein Beispiel nennen?“ induziert eine Veranschaulichung, eventuell eine Transferleistung zu den Inhalten des Lernprogramms.

Es wird auf den Aufbau von Vertrauen geachtet. Es muss für die Schüler deutlich werden, dass die Interviewleiterin außerhalb schulischer Bewertungs- und Weisungskontexte steht. Deshalb wird in der Anleitung verdeutlicht, dass die Vorstudie keinen Leistungsraum darstellt (Anhang C.1). Der Leitfaden wird auswendig gelernt sodass die Atmosphäre eines freien Gesprächs entstehen kann. Eine Pilotphase wird ausgelassen, da die Interviewerin über ausreichend Erfahrungen in der Interviewtechnik verfügt. Eine Reflexion des eigenen methodischen Vorgehens und Kontrolle der Transkripte findet anhand der Tonaufnahmen nach jedem Interview statt. Die Tonaufzeichnung der sprachlichen Äußerungen werden in eine lesbare Form überführt. Die Transkriptionsarbeit wird von einer fachkompetenten Hilfskraft übernommen, bei der von einem inhaltlichen Interesse am Gegenstand ausgegangen werden kann. Durch die *Transkription* erhält man eine vollständige Dokumentation des Interviewinhalts und -ablaufs. Die Aussagen der Probanden werden im nächsten Schritt auf die jeweiligen Leitfadenfragen bezogen und anhand dieser sortiert. Die Auswertung geschieht mit qualitativ-interpretativen Techniken. Die Interpretationen werden argumentativ abgeleitet. Mit diesen Maßnahmen sind die allgemeine Gütekriterien qualitativer Forschung (Mayring, 1990a, 103f), welche die Validität des Verfahrens sichern, weitgehend erfüllt.

Allgemeine Rahmenbedingungen

Für die Studien werden Räumlichkeiten gewählt, die für die Probanden vertraut sind. Die Schüler werden je nach Länge der Sitzung bezahlt (5-7-10€ von $\frac{3}{4}$ bis $1\frac{1}{2}$ Stunden). Schüler, die aus der Nachbarschaft der Autorin akquiriert werden, erhalten kleine Geschenke. Die Erwachsenen nehmen an der Vorstudie auf der Basis von Freundschaft teil. Im Laufe der Studie wird für ausreichende Erfrischungspausen gesorgt (Tee, Kuchen, Bewegung), damit die Probanden nicht überfordert werden. Diese Faktoren tragen zusätzlich zum Erfolg des Interviews bei. Die Sitzungen werden der Abbildung 7-9 entsprechend „kreuzweise“ oder „versetzt“ organisiert. Die Tabelle 7-5 gibt über die Probandenzahl und Organisationsform der einzelnen Studien einen Überblick.



	1. Teil des Lernprogramms	2. Teil des Lernprogramms
1. Vorstudie „Bildversion“	5 Schüler, 5 Einzelinterviews	-
2. Vorstudie „Animationsversion“	5 Schüler und 1 Erwachsene, 2 Einzel- und 2 Paar-Interviews	3 Schüler und 1 Erwachsene, 2 Einzel- und 1 Paar-Interviews

Tabelle 7-5: Überblick der Vorstudien zur Bild- und Animationsgestaltung.

1. Vorstudie: Optimierung der Bider und des Lernprogramms

Die Probanden der ersten Vorstudie waren Schüler der 8. Klasse (N=5), Gymnasium. Die Schüler erhalten die anonymisierenden Nummern (P1 bis P5). Die Auswahl der Probanden erfolgte durch die ihnen vertraute Lehrkraft, und zwar auf der Basis der Vorgabe, dass die Probanden kommunikativ sein sollten. Von dem Lehrer wurden begabte Schüler mit einer Physioknote von 1 bis 2 ausgewählt. Die Studie verlief in einem ruhigen, für die Schüler bekannten Kursraum des Schulgebäudes. Die Sitzungen dauerten ca. 1,5 Stunden in einem Zeitraum von 12:00 bis 16:00 Uhr. Es handelt sich dabei um Einzelerhebungen. Die Schüler hatten den Schultag hinter sich, wirkten jedoch trotzdem aufgeweckt und kooperativ. Die Sitzpositionen waren in der Lernphase gegeneinander versetzt (Abbildung 7-9), während des Interviews rückte die Interviewleiterin neben den Probanden. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Interviews und ihre Folgerungen für die Gestaltung des Lernprogramms zusammengefasst:

Bewertung des Lernprogramms

Alle Probanden finden die Bilder und den Text verständlich. Im Allgemeinen wird das Text-Bild-Verhältnis (auf einer Seite wenig Text und ein großes Bild) als angenehm empfunden.

Für die Empfindung der Schüler gab es jedoch auch Seiten im Lernprogramm mit zu viel Text (sieben Sätze). Diese Seiten wurden geteilt. So entstand aus der 27-seitigen Version eine überarbeitete Form mit 40 Seiten (zwei bis vier Sätze auf einer Seite). Bildleere Seiten wurden nur flüchtig gelesen. Eine Erklärung könnte dafür die Aussage von P2 liefern: „Jede Sache, was man verstehen soll, ist mit Bildern gezeigt.“ Das weist darauf hin, dass nur visualisierte Inhalte aus Schülersicht als wichtig erscheinen. Drei Probanden wünschen sich Animationen und reale Gegenstände, um experimentieren zu können.

Bildgestaltung

Nicht eindeutige Gegenstände sollten aus mehreren Perspektiven gezeigt werden, so z.B. wäre auf der Seite 5³⁶ das rechte Bild ohne das linke für die Schüler nicht erkennbar.

„Ohne den gestrichelten Umriss der vorderen und hinteren Mattscheibe (I/S.9) bzw. ohne den Text könnte man denken, dass die drei Mattscheiben gleichzeitig da sind“ (P1). Die gestrichelte Linie deutet den Gegenstand an (P3: „als es wäre“). Die Zeichnung sollte weiterhin mit Pfeilen ergänzt werden, die die Verschiebung symbolisieren, meinte P2. Die angesprochenen Bildelemente waren schon als Alternativversionen vorhanden. Die Schüler haben dann die für sie verständlichste Version ausgewählt.

Die Hauptbotschaft des Bildes I/S.11f – die Lichtausbreitung – wurde von jedem Probanden erkannt. Die Pfeile erfüllen ihre Funktion, sie zeigen nicht nur die Bewegung, sondern für einen Probanden stellen sie auch die Geradlinigkeit dar (P3: „das Licht breitet sich gerade aus, gezeigt durch die Pfeile“). Die Pfeile werden auch in anderen Bildern I/S.14f von allen Probanden als Hinweis für die Bewegung erkannt. Interessant ist, dass zwei Schüler (P1, P3) bei Bild I/S.11f in der Vorstellung „Lochkamera“ verharren und die Zeichnung aus der Perspektive beschreiben, als ob sie in der Lochkamera sitzen würden: „Einmal ist hier die Lochkamera mit diesem Loch, dann ist das Licht, wie es sich verbreitet. Es geht von außen nach innen und wird dann halt immer größer. Sodass dann die ganze Lochkamera mit Licht gefüllt ist.“ (P1). Sie erkennen die Glühlampe in der Zeichnung nicht, sondern vertauschen sie mit dem Loch der Kamera.

Das „Trichtermodell“ des Lichtes im Bild I/S.14f wird folgendermaßen kommentiert: „das Licht wird immer größer“ (P3); „das Licht wird immer breiter“ (P5). Im Bild I/S.17f wird erkannt, dass die Glühlampe im Zylinder ist. Die Löcher werden als Ursache der Lichtbündel interpretiert (P5): „In der Dose ist kein Bündel, es ist hell. Durch die Löcher kommen die einzelnen Strahlen raus.“

Das Bild I/S.20 müsste durch die Darstellung einer menschlichen Hand ergänzt werden. Ohne diesen Handlungskontext konnten die Probanden die räumliche Anordnung vom Laserpointer und Papierblatt nicht erkennen. Es wurde weiterhin ein Photo (I/S.19) eingesetzt. Um das Wesentliche zu veranschaulichen, reichen drei Punktlichtquellen der Flamme aus (I/S.29 rechts). Dieses Bild muss aber stufenweise in einer Bildreihe entwickelt werden (I/S.28f), sonst scheint der Sachverhalt für die Schüler zu kompliziert zu sein.

36 Die Seitenzahlen in diesem Abschnitt beziehen sich auf das erste Teil des Lernprogramms, siehe Anhang A.1.

Bei der optischen Abbildung durch ein Loch (I/S.33-35) sollen sowohl die dünnen Lichtbündel als auch der „Lichtfleck“ auf der Mattscheibe dargestellt werden: „Der Fleck ist wichtig. Man sieht besser, dass davon ein Bild entsteht.“ (P5); „Ohne den Fleck sieht man nicht, dass die Lichtbündel auf die Mattscheibe auftreffen.“ (P2); „Die Strahlen sind auch wichtig im Bild. Man sieht genauer, dass mehrere Strahlen aus einer Punktlichtquelle eintreffen.“ (P3).

Die Notwendigkeit des Loches für die optische Abbildung wird im Bild (I/S.41) erkannt: „Es muss unbedingt das Loch geben, ansonsten entsteht kein Bild.“, sagt P5. Die Schüler brauchen aber auf der visuellen Ebene den stufenweisen Wechsel zwischen der gewohnten, dreifarbigem Flamme und der neuen Darstellungsform (einfarbige Flamme). Deshalb wird Bild I/S.40 eingefügt: „Die Farben werden jetzt nicht mit dem Loch sortiert, sondern es kommt ein bunter Wirbel auf die Mattscheibe.“ (P1).

2. Vorstudie: Optimierung der Animationen

In der zweiten Vorstudie wurde die Animationsversion des Lernprogramms erprobt. Die Probanden waren fünf gymnasiale Schüler zwischen 11 und 14 Jahren (N=5). Außerdem wurden in die Studie zwei Erwachsene wegen ihres Berufs (Kameramann (P1) und Medienwissenschaftlerin (P3)) einbezogen. Die Studie bestand aus Einzelerhebungen (n=4) und aus Paar-Interviews (n=3, P4-P5, P6-P7). Der Vorteil des Paar-Interviews besteht darin, dass die jüngeren Schüler sich dabei sicherer und nicht an einen Erwachsenen ausgeliefert fühlen. Der Nachteil ist, dass Gruppeninterviews schwieriger zu führen sind. Die Sitzungen wurden in der Kreuz-Form organisiert (Abbildung 7-9). Die Rahmenbedingungen der zweiten Vorstudie waren sehr unterschiedlich: Das Alter der Probanden, die Räumlichkeiten, die Dauer der Sitzungen, ihre Tageszeit und der jeweilige Lernprogrammteil sind in der Tabelle 7-6 zusammengefasst. Der Verlauf der zweiten Vorstudie entspricht der ersten (siehe oben). Das anschließende Interview beinhaltet jedoch nur die allgemeinen Fragen zum Lernprogramm (Leitfaden 2.0, 2.2; Anhang C.2).

Proband	Alter	Ort	Dauer (in Min)	Tageszeit	Teil des LP
P1, Andrés	30	Privatwohnung der Interviewleiterin, Berlin	139	abends	1.
P2, Aura	14		55		1.
P3, Hajnalka	25		40	vormittags	2.
P4, Kiki	11		25		2.
P5, Fiona	13		105		nachmittags
P6, Daniel	13	Leibniz Gymnasium, Potsdam	59	nachmittags	1.
P7, Christoph	12		30		2.

Tabelle 7-6: Charakteristik der Probanden und die Rahmenbedingungen der zweiten Vorstudie (LP - Lernprogramm).

Bewertung des Lernprogramms

Alle Probanden behaupten, dass man sich durch die Animationen und Bilder die Inhalte gut vorstellen und verstehen kann. Sie finden unterstützend, dass man die Animation nochmal starten und den Text nochmal lesen kann. Sie empfinden weiterhin die Navigation im Lernprogramm leicht. Drei Probanden finden die Zusammenfassung der Inhalte am Ende des Lernprogramms „richtig gut“. Vier Schüler wünschen sich das Bau einer Lochkamera und Aufgaben zum Lösen. Dies kann als Wunsch nach mehr Eigenaktivität interpretiert werden.

Interessant ist im Hinblick auf die Visualisierungen die Diskrepanz zwischen dem, was der Kameramann (P1) äußert, und den Äußerungen der Schüler. P1 findet die dreidimensionalen Bilder besser als die zweidimensionalen. Er bevorzugt weiterhin Bilder, die auch den Hintergrund zeigen. Die anderen Bilder sind für ihn „zu abstrakt, sie schweben in der Luft“. Die Medienwissenschaftlerin (P3) empfindet die Handzeichnungen ihrem Charakter nach zwar „amateurhaft“, jedoch zu Kindern näher stehend als eine perfekte Computergrafik.

Die Schüler der Vorstudie erwähnen in ihren Aussagen keinen Unterschied zwischen der 2D- und 3D-Darstellung. Alle (!) empfinden die Handzeichnungen und Animationen gerade richtig und nicht zu kindisch: „Die Handzeichnungen sind leicht zu erkennen, also man weiß sofort, was damit gemeint ist.“ (P2); „Die Bilder sind einfach und somit auch einfacher, besser aufzunehmen.“ (P7); „Diese Zeichnungen fand ich gut, weil die waren wirklich einfach und haben genau das in den Mittelpunkt gestellt, was auch in den Mittelpunkt zu stellen war oder worum es ging, obwohl ich High Tech sehr gut finde.“ (P6). Diese Aussagen unterstreichen die *Akzeptanz der einfachen Visualisierungen* aus der Schülerperspektive.

Gestaltung von Animationen (1. Teil)

Anhand der Interviews können zwei wesentliche Sachverhalte zu beiden Teilen des Lernprogramms festgestellt werden:

- Die Bildelemente und Prozesse werden in den Animationen richtig erkannt.
- Die Animationen haben sich als hilfreich für das Verständnis der Lerninhalte erwiesen.

Die hier folgende Zusammenstellung von Schüleräußerungen soll für dieses Fazit als Nachweis dienen:

Die Überblendung in der Animation I/S.3 wird von den Schülern richtig interpretiert: „Wie ein Röntgenblick, als wenn man durch den Karton durchgucken könnte.“ (P6). Der Zoom-Effekt in I/S.7 konzentrierte die Aufmerksamkeit der Schüler auf das Ergebnis der optischen Abbildung. Ein Schüler beschreibt auch die Methode selbst: „Das Bild hat sich immer weiter auf dem Baum und den Karton konzentriert und ist immer näher herangefahren“ (P7).

Die abstrakte Darstellung in der Animation I/S.11f lässt Freiraum für die Phantasie der Schüler. Sie geben der Glühlampe einen räumlichen Kontext und nehmen die *Lichtausbreitung als Prozess* wahr: „Ich sehe eine Glühbirne und Licht eben. Das Licht breitet sich von der Lampe in alle Richtungen aus. Also bescheint das ganze Fenster.“ (P2); „Ich sehe erst mal Dunkelheit im Raum, dann wird es mit dem Licht von der Glühbirne ausgefüllt.“ (P4); „Diese kurze Dun-

kelheit können wir aber nicht wahrnehmen. (P5)“ „Also ich sehe einen Karton und in der Mitte des Kartons ist da eben eine Glühbirne, die an ist und damit dann Licht ausstrahlt und dadurch wird dann die Dunkelheit verdrängt.“ (P7); „Das Licht strahlt sich nach allen Seiten aus, also das es nicht nur in eine Richtung geht wie ein gerader Strahl, sonder das es nach Überall geht. Bis nur dieser Karton kommt und das Licht dann aufhält.“ (P6). Eine genaue Beschreibung liefert einzig der Erwachsene (P1): „Ich sehe eine leuchtende Glühbirne: gelbe Kreise, die sich ausbreiten.“

Die Schüler erkennen gleich, dass die Animationen I/S.22, I/S.25 zu der Perspektive der Identifikationsfigur wechseln: „Am Anfang sehe ich ein Männchen, das mit der Pappröhre auf die Lampe guckt. Dann sehe ich durch die Pappröhre, und durch die Pappröhre sehe ich auf die Lampe.“ (P2); „Jetzt guckt man durch das Rohr, wie der Junge.“ (P6). Für den Kameramann (P1) war der *Perspektivwechsel* auch erkennbar: „Das ist point of view. Point of view sagen wir, wenn die Kamera identisch mit der Person ist. Wir sehen also genau das, was die Augen sehen.“

Der *physikalische Sehvorgang* wird durch die Animation I/S.25 verstanden: „Im zweiten Bild sieht man, dass von diesem einen Lichtpunkt schon sehr viele Lichtstrahlen ausgehen und einer davon genau durch die Pappröhre geht und genau ans Auge trifft.“ (P7); „Das Licht muss durch die Pappröhre laufen, dann sehen wir die Glühbirne.“ (P4); „Wieder ein Mensch, der mit der Pappröhre auf die Glühbirne guckt und durch die Pappröhre verläuft ein Strahl zu den Augen. Dass man den dann sieht.“ (P2); „Wenn seine Augen das Licht wahrnehmen, erblickt der Junge diese Glühbirne. Ist es in seiner Röhre noch dunkel, er sieht dann gar nichts. Erst, wenn das Licht durch die Röhre durch ist, kann der Junge das sehen.“ (P5). Durch die Visualisierung I/S.33-37 erkennen die Schüler, dass Lichtbündel durch das Loch laufen müssen, um eine Abbildung der Kerzenflamme („Lichterergebnisse von der Flamme“ P5) zu bekommen. Dieses Verständnis findet seine Anwendung, wenn die Blende zwischen der Kerze und Mattscheibe entfernt wird (I/S.40f): „Die Lichtbündel gelangen von jedem Abschnitt der Kerze überall hin auf die Mattscheibe und dadurch wird kein sortiertes Bild entstehen.“ (P7); „Es erscheint eben kein Bild, sondern überall ist jetzt einfach das Licht da“ (P5). Eine Erklärung für die Umkehrung des Bildes, was als bedeutende Transferleistung angesehen werden kann, findet nur P1: „Ich habe jetzt kapiert, warum die Abbildung umgekehrt ist. Weil das Loch im Verhältnis zur Mattscheibe klein ist. Wenn ich auf der Mattscheibe sitzen würde, könnte ich von Oben die obere Kannte von der Flamme nicht sehen, nur die untere.“

Gestaltung von Animationen (2. Teil)

Die Lochkamera in II/S.4 wurde sowohl auf der Zeichnung als auch auf dem Foto erkannt. Auf den Vorschlag von P3 hin wurde die Überblendung verlangsamt.

Der Zusammenhang zwischen Lochgröße und *Abbildungsqualität* ist für die Probanden anhand der Animationen einleuchtend (II/S.5-12): „Wenn das Loch größer ist, dann wird das Bild weniger scharf sein.“ (P3); „Die kleinen Punkte ergeben ein scharfes Bild, die großen Punkte ein unscharfes.“ (P6); „Bei einem großen Loch ist das Bild heller, aber unscharf. Bei einem kleinen Loch, wird das Bild sehr scharf aber dunkel.“ (P2).

Die *optische Abbildung* wird anhand der Animation II/S.9 als Prozess beschrieben: „Da kommt ein gelber Strahl von der Sonne und trifft auf den Baum und von dem Baum gehen dann grüne Strahlen in das Loch und dadurch kommt auf die Mattscheibe ein Baum. Durch das Loch wird also der Baum fotografiert oder gesehen.“ (P2); „Das Licht von der Sonne trifft auf die Blätter des Baumes ein, die reflektieren das Licht weiter. Es gehen dann mehrere große Lichtbündel durch das große Loch und verteilen sich dann auf der Mattscheibe.“ (P7).

Die fotografische und zeichnerische Darstellung der gleichen Anordnung (II/S.19) sind hilfreich, „weil die Zeichnung nicht so dunkel ist und man sieht da auch die Mattscheibe“ (P2). Die Probanden erkennen die Notwendigkeit der Existenz des Lichtes für eine optische Abbildung: „Es wird nur die Kerzenflamme abgebildet, und wo es dunkel ist, bleibt weiterhin Dunkelheit.“ (P3); „Das Wachs sendet keine Lichtbündel aus (P7). Man könnte es mit einer Taschenlampe leuchtend machen, dann werden Lichtbündel vom Kerzenstumpf reflektiert (P6).“

Die *Streuung* in der Animation (II/S.24) wird genau beschrieben: „Von der Lampe kommen gelbe Lichtstrahlen heraus und ein Lichtstrahl trifft auf das Wachs und wo die Kerze getroffen ist, kommen wieder neue, rote Lichtstrahlen in alle Richtungen (P2).“

Die *Abbildung des gestreuten Lichtes durch die Linse* (II/S.25f) wird unterschiedlich tief verstanden, jedoch anhand der Animation richtig wahrgenommen: „Die Lampe leuchtet auf das Kerzenwachs und dadurch kommt es durch die Linse auf die Mattscheibe. Die Flamme leuchtet ja sowieso selber, deswegen ist sie sichtbar auf der Mattscheibe (P2).“ „Die Aufgabe der Linse ist, das Licht in einem Punkt zu fokussieren. Das Licht, das von der Lampe rausgegangen und durch die Kerze gestreut ist (P3).“ „Das gestreute Licht des Kerzenstumpfs kann man nicht sehen (P7). Die Sammellinse sammelt es dann sozusagen wieder ein. Das Licht wird dann durch die Linse auf der Mattscheibe zu einem Bild gesammelt (P6).“

Die Veränderungen im Bild durch die Verschiebung der Mattscheibe gegenüber der Kerze werden anhand der Animationen II/S.28f richtig beschrieben: „Die Mattscheibe wird hin und her bewegt und die Kerze ist immer ganz unscharf und nur an einem bestimmten Punkt ist sie dann scharf (P2). Wo die Abbildung scharf wird, ist der Brennpunkt der Linse (P6). Bei der Lochkamera kann es gar kein Brennpunkt geben, weil das Licht eine trichterförmige Form hat und dann ja immer größer wird. Um so weiter man von dem Loch weg ist, um so größer ist das Bild (P7).“

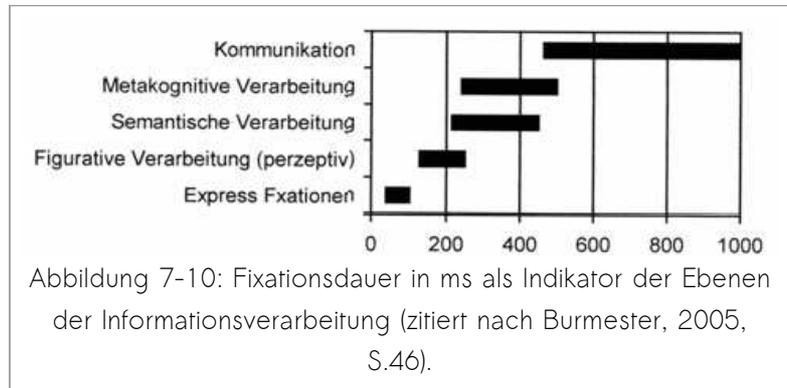
Anhand dieser Interviews bedarf es nur einer minimalen Optimierung der Bilder und Animationen. Insofern haben sich die Gestaltungsprinzipien und deren Umsetzung für die Schüler als nützlich und angemessen erwiesen.

7.6 Ergebnisse der Blickbewegungsanalyse

Die Untersuchung von Hofmann et al. (2009), die sich der Methode der Blickbewegungsanalyse (*eye tracking*) bediente, lief nach dem Abschluss der Hauptuntersuchung der vorliegenden Arbeit. Da dieses Verfahren die Aufzeichnung und Rekonstruktion der Blickbewegungen der Schüler ermöglicht, kann Aufschluss über den Wahrnehmungsprozess visuell präsentierter

Inhalte am PC gegeben werden (Rayner, 1992). Die erhaltenen Ergebnisse bestätigen viele der Entscheidungen zur Gestaltung der Visualisierungen des Lernprogramms und werden deshalb hier aufgeführt.

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse sollen zunächst einige grundlegende **Blickparameter** erläutert werden (Burmester, 2005, S.43ff, 47). Eine *Fixation* liegt vor, wenn sich das Auge in relativer Ruhe zum Sehobjekt befindet. Die Länge einer Fixation bezeichnet man als *Fixationsdauer*. Sie wird als



Zeit der Informationsaufnahme interpretiert. Ein Zusammenhang zwischen der Fixationsdauer und der Ebenen der Informationsverarbeitung konnte in verschiedenen Studien festgestellt werden (Burmester, 2005, S.46). Eine Zusammenfassung zeigt die Abbildung 7-10. Die mittlere Dauer der visuellen Verarbeitung ist ca. 200ms. Allgemein gilt, dass die Betrachtung eines Bildes, wie das Lesen eines Textes ein sprunghafter Prozess ist. Die schnellen Blickbewegungen, die dazu dienen, das Auge auf ein neues Sehobjekt zu richten, heißen *Sakkaden* (Dauer 30 – 40ms). Während dieser Augenbewegung geschieht keine Wahrnehmung.

In der Untersuchung wurde eine Software verwendet, die das Erzeugen sogenannter *Hotspots* (Anhang B) für jede Seite des Lernprogramms ermöglichte. Dabei wurden die Fixationen aller Versuchspersonen übereinander gelegt. Diese *Anzahl der Fixationen* kann als Maß für die Verarbeitungsanforderungen bzw. für das Interesse der Versuchspersonen gewertet werden. Anhand der Einfärbung werden somit **Bereiche erhöhter Aufmerksamkeit** sichtbar. Es lässt sich ermitteln, welches Blickgebiet prozentual am häufigsten und welches am wenigsten fixiert wurde (Abbildung B-1 im Anhang B). An dieser Stelle muss man erwähnen, dass der **Bereich des scharfen Sehens** am besten im Zentrum des Blicks (der Fovea auf der Netzhaut) ist, wohin auch fixiert wird. Außerhalb der Fovea nimmt die Sehschärfe merklich ab. Der Wahrnehmungsbereich beträgt jedoch immerhin 3 bis 4 Buchstaben nach links und 14 bis 15 Buchstaben nach rechts (Rayner et al., 2001, S.46). Innerhalb der Fixation geschieht also Wahrnehmung auch im peripheren Bereich. In einem Bild wird dementsprechend nicht nur das wahrgenommen, wohin der Proband fixiert hat, sondern es werden Sehobjekte auch in einem größeren Umkreis wahrgenommen.

Die Studien wurden als Einzelplatzuntersuchung mit dem ersten Teil des Lernprogramms durchgeführt. Nach der Lernphase haben die Probanden den Wissenstest T_1 (Abschnitt 8.3.4) bearbeitet. Im Folgenden sollen drei für die visuelle Darstellung bedeutsame quantitative Ergebnisse vorgestellt werden. Die ersten beiden Ergebnisse wurden aus einer Vorstudie (N=24, 7.Klasse, Gymnasium; Hofmann et al., 2008, S.357 (Punkt a); Hofmann & Nordmeier, 2008, S.3 (Punkt b)) und das dritte Ergebnis aus der Hauptuntersuchung (N=102, 7.Klasse, Gymnasium; Hofmann et al., 2009, S.245 (Punkt c)) gewonnen:

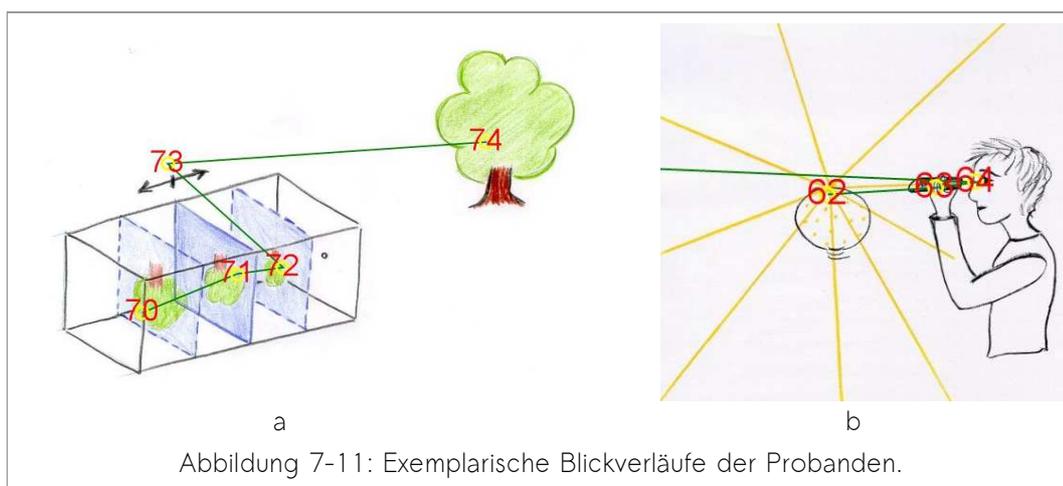
- a) In der Vorstudie zeigte sich, dass die Textgestaltung die Bildwahrnehmung beeinflusst. Die Schüler der K-Gruppe (Treatmentgruppe mit lokal hoch kohäsiven Lerntext, Abschnitt 7.1) nahmen mehr Einzelheiten im Bild wahr. Das Bild wurde umfassend wahrgenommen. Dies kann als eine positive Auswirkung von einem erhöhten Text-Bild-Zusammenhang gewertet werden. Dieses Ergebnis begründet zusätzlich den Einsatz der lokal hoch kohäsiven Textversion in der vorliegenden Untersuchung.
- b) Die durchschnittliche Gesamtblickzeit auf den Bildern ist bei Schülern, die noch nie oder ganz wenig mit Lernprogrammen gearbeitet haben, signifikant größer als bei Schülern, die regelmäßig mit Lernprogrammen umgehen.
- c) Die Relevanz der genauen Betrachtung von Bildern für den Wissenserwerb konnte bestätigt werden. Schüler, die Bilder deutlich häufiger und länger fixiert haben, konnten das entsprechende Item im Wissenstest T_1 richtig bearbeiten (z.B. die Abbildung B-16 links: allseitige Lichtausbreitung). Schüler, die diese Bilder nur sehr flüchtig betrachteten, konnten die dargestellten Inhalte nicht wiedergeben. Dieses Ergebnis bestätigt die Relevanz der intensiven Bildwahrnehmung für die Behaltensleistung.

Die relevanten Aufmerksamkeitsbereiche können sowohl quantitativ als auch qualitativ analysiert werden (Häufigkeit, Position und inhaltlicher Bezug der Fixationen). Dafür werden in der folgenden Beschreibung die Hotspots von Probanden herangezogen, die in der Hauptuntersuchung mit dem lokal hoch kohäsiven Lerntext gearbeitet haben (N=50, 7. Klasse, Gymnasium). In dieser reduzierten *Eye-Tracking*-Version des Lernprogramms (Anhang B) befinden sich an 27 Seiten 34 Bilder. Die folgenden Aussagen können anhand der Blickparameter getroffen werden:

- Die Bilder wurden von den Schülern immer angeschaut. Von 34 Bildern sind 22 Bilder (64,7%) zu Blickgebieten häufigster Fixation innerhalb einer Seite geworden, d.h. diesen (rot gekennzeichneten) Blickgebieten wurde eine sehr hohe Aufmerksamkeit innerhalb einer Seite gewidmet.
- Die Bilder wurden auf 33,3% der Seiten des Lernprogramms sogar häufiger fixiert als der Text. Auf diesen Seiten (Abbildungen B-5, B-6, B-8, B-12, B-17, B-18, B-20, B-22, B-25) bekamen die Bilder eine größere Aufmerksamkeit als der Text. Die dargestellten Inhalte sind dabei die phänomenologische Beschreibung der Bildentstehung an der Lochkamera (sowohl am Beispiel des Baums als auch am Beispiel der dreifarbigem Kerzenflamme), das Flüssigkeitsmodell des Lichtes und die Lichtausbreitung aus einer Punktlichtquelle der Kerzenflamme. Für diese Inhalte war also die visuelle Darstellung schülergerechter.
- Eine erhöhte Anzahl an Fixationen von lernrelevanten Inhalten innerhalb des Bildes weist darauf hin, dass durch die Anwendung der Gestaltungsprinzipien eine Blickzuwendung erreicht wird, ferner, dass die relevanten Bildinhalte zum Gegenstand der Bildauswertung werden. Dazu einige Beispiele: Schon im ersten Bild (B-2) werden die Mattscheibe und das Loch als die wichtigsten Elemente der Lochkamera erkannt. Dementsprechend werden bei

der optischen Abbildung einer Kerzenflamme das Loch und das Abbild am häufigsten fixiert (B-20, B-26). Aber auch bei der Erklärung der optischen Abbildung (B-21, B-22) stehen die Ursache (Ausbreitung der dünnen Lichtbündel aus einer Punktlichtquelle der Kerzenflamme) und ihre Wirkung (Antreffen auf der Mattscheibe) in der Mitte der Aufmerksamkeit der Schüler.

- Die Bilder konnten mittels höchstens zweier Fixationsbereiche verarbeitet werden. Die Leitidee der Einfachheit der Darstellung konnte also erfolgreich umgesetzt werden.
- Das Gesicht und die Hände der Identifikationsfigur und damit auch ihre Handlungen gehören zu den Gebieten höchster Aufmerksamkeit. Insofern hat sich ihr Einsatz als sinnvoll erwiesen.
- Anhand der Hotspots wird auch deutlich, welche Bilder bzw. Bildelemente überflüssig sind: Abbildung B-5 sollte auf der nächsten Seite nicht wiederholt werden; es scheint überflüssig, in Bild B-8 die Dunkelheit zu zeigen. Weiterhin hebt das Foto B-11 die Inhalte offenbar nicht genug hervor, hier könnte eine Zeichnung besser sein; die Sonne scheint in Bild B-12 überflüssig, der Text reicht an dieser Stelle offenbar aus. Da die blauen dünnen Lichtbündel von den Probanden nicht fixiert werden (B-22, 23, 24), hätte für die Erklärung der Bildentstehung vermutlich auch eine zweifarbige Kerzenflamme ausgereicht.
- Die Rekonstruktion der Blickverläufe zeigt, wie Größenverhältnisse und das Gesetz der Dynamik von links nach rechts tatsächlich den Blickverlauf steuern (Abbildung 7-11a). Ihre Wirkung auf die Betrachtung ist stärker als die der Richtungspfeile. Ein weiteres Indiz für diese Vermutung ist, dass bei der Darstellung des physikalischen Sehvorgangs auf die Verwendung eines Pfeils verzichtet wurde. Die Probanden betrachten das Bild trotzdem der Ursache-Wirkung-Kette entsprechend (Abbildung 7-11b). Der Blickpfad wurde hier lediglich durch die Anwendung der „Dynamik von links nach rechts“ und der „glatt durchlaufenden Linie“ angelegt.



- Die Steuerung der Aufmerksamkeit innerhalb eines Bildes wird vermutlich auch durch die sprachliche Gestaltung des Textes mitbestimmt (Hofmann & Nordmeier, 2008, S.4). So ent-

sprechen zum Beispiel in der Abbildung B-7 die am häufigsten fixierten Textstellen („Schieben wir ...“ und „Das Bild wird größer“) dem am häufigsten fixierten Blickobjekt.

Da eine erhöhte Anzahl an Fixationen auch die Wichtigkeit eines Blickobjektes aus der Lernerperspektive bestimmt, unterstreichen die Ergebnisse die Notwendigkeit der visuellen Darstellung. Die erhöhte Beachtung der Bildbereiche hoher inhaltlicher Bedeutsamkeit *bestätigt die Wirksamkeit der Gestaltungsprinzipien* (Abschnitt 2.5).

8 Fragestellung und Methode

„Je konkreter eine Frage ist, desto einfacher ist es sie zu beantworten.“

In diesem Kapitel wird das Untersuchungsvorhaben anhand Bortz & Döring (2003, S.53-62) eingeordnet und methodisch vorgestellt. Da zu der gewählten Thematik ausreichend theoretische Arbeiten und Untersuchungen vorliegen (Kapitel 2, 3, 4), wird eine explanative Untersuchungsart gewählt, die die Formulierung und Überprüfung von begründeten Hypothesen zulässt. Dabei handelt es sich im Hinblick auf die Zielsetzung der Studie um Unterschieds- und Zusammenhangshypothesen. Es werden weiterhin auch methodische Ansätze eingesetzt, die zu anderen Untersuchungsarten gehören, wie die deskriptive Untersuchung (die Stichprobe wird anhand von Kontrollvariablen beschrieben) oder die explorative Untersuchung (die Kategoriensysteme zu den offenen Antwortformaten werden anhand der qualitativen Inhaltsanalyse gebildet).

8.1 Forschungsfragen und Hypothesen

In der bisherigen Forschung zur Wirkung von Visualisierungen auf den Wissenserwerb war die zentrale Frage, ob Bilder oder Animationen besser seien für den Lernerfolg (vgl. Weidenmann, 1994, S.498). Nach der Prüfung von Bedingungen für den Einsatz und die Gestaltung von statischen bzw. dynamischen Visualisierungen hat sich gezeigt (Kapitel 2 und 3), dass diese Forschungsfrage differenzierter gestellt werden muss, und zwar danach, *unter welchen Bedingungen* Animationen positiv auf den Lernerfolg wirken. Im Kontext dieser umfassenderen Forschungsfrage wird die Untersuchung angelegt und es wird versucht, auf einige Teilspekte eine Antwort zu erhalten.

Die Festlegung der Bedingungen, wie die Wahl der Stichprobe und des Lerninhalts, präzisiert die Forschungsfrage: Es werden Veränderungen im Wissenserwerb von Novizen untersucht (Abschnitt 8.4), einmal bedingt durch den Einsatz von Animationen, das andere Mal durch den Einsatz von Notizen (Kapitel 4). Da die Anregung von kognitiven Aktivitäten ein entscheidender Faktor für die Bildwirkungen beim Wissenserwerb ist (Peeck, 1994), wird als zweite unabhängige Variable die „Lerneraktivität“ einbezogen. Als konkrete Realisierung dessen werden die Lernenden zur Anfertigung von Notizen aufgefordert. Die Hauptfragestellung dieser Untersuchung lautet dementsprechend:

- I. Wie wirken sich Animationen, die die Phänomene der Lichtausbreitung, des physikalischen Sehvorgangs und der Streuung darstellen, auf den Wissenserwerb von Novizen aus
- II. Unterstützt das Anfertigen von Notizen während des Lernens den Wissenserwerb?

Im Fokus der Auswertung steht daher die abhängige Variable „Wissenserwerb“, die weiterhin nach Behaltens- und Transferleistung differenziert wird (Abschnitt 8.3.4). Da die individuel-

len (räumlichen und sprachlichen) Fähigkeiten und Voraussetzungen (Geschlecht, Vorwissen) den Wissenserwerb ebenfalls beeinflussen (Kapitel 5), werden sie in die Forschungsfragen und deren Untersuchung mit einbezogen. In Anlehnung an die dargestellten theoretischen Überlegungen und empirischen Ergebnisse, sowie im Hinblick auf das Lernprogramm der Untersuchung werden die folgenden Forschungsfragen formuliert und die dazugehörigen Hypothesen aufgestellt:

1. Wie wirken sich theoriegeleitete und einfach gestaltete Animationen bei Novizen auf den Wissenserwerb zur optischen Abbildung aus?

Hypothese 1: Animationen (A) führen zu einer besseren Behaltens- und Transferleistung als statische Bilder (B): $A > B$.

2. Fördert die animierte Darstellung der Lichtausbreitung, des physikalischen Sehvorgangs und der Streuung den Erwerb einer physikalischen Vorstellung der Lichtausbreitung bei Novizen, wenn die Lerninformation hauptsächlich visuell dargeboten wird?

Hypothese 2: Lernende der Animationsgruppe entwickeln ihre Vorstellungen in Richtung der physikalischen Modelle weiter als Schüler der Bildergruppe: $A > B$.

3. Unterstützt das Anfertigen von Notizen (N) den Wissenserwerb von Novizen in Bezug auf optische Abbildungen?

Hypothese 3: In der Treatmentgruppe „Notizen“ tritt eine stärkere kognitive Auseinandersetzung mit dem Lernprogramm und dadurch eine bessere Behaltensleistung auf: $N > kN$ ³⁷.

4. Wird der Lernerfolg durch gleichzeitigen Einsatz von Animationen und Anfertigen der Notizen besonders unterstützt?

Hypothese 4: Der größte Lernerfolg wird in der Gruppe eintreten, in der Animationen im Lernprogramm integriert sind und die Schüler zusätzlich Notizen anfertigen sollen: $A + N > A + kN, B + N, B + kN$.

5. Wie wirkt sich die unterschiedliche Ausprägung des *räumlichen Vorstellungsvermögens* (RV) auf das Lernen mit Bildern und Animationen aus?

Hypothese 5.1: Schüler mit hohem räumlichen Vorstellungsvermögen (RV+) erreichen eine bessere Lernleistung als Schüler mit niedrigem räumlichen Vorstellungsvermögen (RV-): $(RV+) > (RV-)$.

Hypothese 5.2: Animationen sind besonders hilfreich für die Schüler mit niedrigem RV, sie erreichen dadurch bessere Lernleistung als ihre (RV-) Mitschüler mit Bildern: $(RV_{A-}) > (RV_{B-})$.

Hypothese 5.3: Schüler der Bildergruppe mit hohem räumlichen Vorstellungsvermögen (RV_{B+}) können die Lernvorteile von Schüler der Animationsgruppe mit hohem räumlichen Vorstellungsvermögen (RV_{A+}) kompensieren: $(RV_{A+}) = (RV_{B+})$.

6. Wie wirkt sich die unterschiedliche Ausprägung der *sprachlichen Fähigkeiten* (SF) auf das Lernen mit Notizen aus?

Hypothese 6.1: Schüler mit hohen sprachlichen Fähigkeiten (SF+) erreichen eine bessere

³⁷ Im Weiteren steht kN für die Treatmentgruppe „keine Notizen“ (Abschnitt 8.2).

Lernleistung als Schüler mit niedrigen sprachlichen Fähigkeiten (SF_{N-}): (SF_{N+}) > (SF_{N-}).

Hypothese 6.2: Zwischen den Schülern niedriger sprachlicher Fähigkeiten, die mit Notizen (SF_{N-}) bzw. ohne Notizen (SF_{KN-}) gelernt haben, wird es einen Unterschied geben. Die Richtung des Unterschieds ist jedoch unbestimmt: (SF_{N-}) ≠ (SF_{KN-}).

Die Hypothesen in Bezug auf die Animationen sind positiv formuliert, obwohl der Forschungsstand auch die Aufstellung negativer Hypothesen begründen würde (Abschnitt 3.2). Die positiven Erwartungen werden mit der theoriegeleiteten Gestaltung begründet, die erhöhte Erwartungen an die Wirkungen der Animationen rechtfertigen (Abschnitt 3.3). Allgemein akzeptiert ist die Annahme, dass ein Treatment für die Unterrichtspraxis dann relevante Effekte erwarten lässt, wenn die Effektstärke mittel bis groß ist (Bortz & Döring, 2003, S.604). Die formulierten Hypothesen sind dann als *spezifische Hypothesen* anzusehen (Bortz & Döring, 2003, S.56), weil sie mit statistischen Signifikanztests nicht nur auf ihre Haltbarkeit geprüft, sondern auch die Effektstärken berechnet werden können (Abschnitt 8.7.2).

8.2 Untersuchungsdesign

Zur Beantwortung der Forschungsfragen und Überprüfung der Hypothesen wird eine empirische Untersuchung durchgeführt, in der die Wirkung von zwei unabhängigen Variablen auf den Wissenserwerb untersucht wird. Die erste unabhängige Variable ist die *Visualisierungsart* des Lernprogramms (Abschnitt 7.4, 7.5) mit zwei Ausprägungen:

- „Bildversion“ des Lernprogramms mit statischen Bildern als visuelle Repräsentationen,
- „Animationsversion“ des Lernprogramms mit dynamischen (und statischen) Bildern als visuelle Repräsentationen.

Der eingesetzten Lernprogrammversion entsprechend gehören die Probanden entweder in die „Bildergruppe“ oder in die „Animationsgruppe“. Die kognitiven Aktivitäten beim Wissenserwerb können durch *Lerneraktivität* angeregt werden (Kapitel 4). Diese zweite unabhängige Variable der Untersuchung wird ebenfalls in zwei Ausprägungen realisiert:

- „Notizen“: die Schüler erhalten die Instruktion zum Anfertigen von Notizen,
- „keine Notizen“: die Schüler erhalten die Instruktion, lediglich mit dem Lernprogramm zu lernen. Hier wird also von den Schülern keine zusätzliche Aktivität außer Hören, Lesen, Verstehen und Navigieren verlangt.

Aus der Fragestellung und den unabhängigen Variablen ergibt sich ein experimentelles 2*2-Design. Die Kombination der beiden Faktoren „Visualisierungsart“ und „Lerneraktivität“ lässt vier Gruppen der Probanden entstehen. Eine Übersicht zum Untersuchungsdesign zeigt die Tabelle 8-1.

		Lerneraktivität	
		Notizen (N)	keine Notizen (kN)
Visualisierungsart	Bild (B)	Notizen & Lernprogramm mit Bildern (B + N)	keine Notizen & Lernprogramm mit Bildern (B + kN)
	Animation (A)	Notizen & Lernprogramm mit Animationen (A + N)	keine Notizen & Lernprogramm mit Animationen (A + kN)

Tabelle 8-1: Das 2*2-Design der Untersuchung.

Als abhängige Variable wird der *Wissenserwerb* gemessen. Die verwendeten Wissenstests sind im Abschnitt 8.3.4 beschrieben. Die Messung erfolgt zu drei verschiedenen Zeitpunkten (Vortest, Nachtest, Langzeittest), deshalb handelt es sich um ein 2*2-Design mit Messwiederholungen. Wie dieses Design in der Untersuchung tatsächlich realisiert wird, ist in Zusammenhang mit dem Ablauf der Untersuchung beschrieben (Abschnitt 8.6).

Zur Festlegung der Stichprobengröße (Probandenzahl N) werden sowohl Normen als auch Erfahrungswerte herangezogen:

- Bei Bortz (2005, S.111) wird der optimale Stichprobenumfang auf der Basis des gewählten Signifikanzniveaus (p) und der Größe des nachzuweisenden Effekts bestimmt (η^2). Bei einem Signifikanzniveau von $p=0,05$ können Effekte mit einer mittleren bis großen Effektstärke erst dann statistisch abgesichert werden, wenn im 2*2-Design pro Treatmentgruppe im Mittel 20 Probanden vorhanden sind. Bortz und Döring (2003, S.616) empfehlen unter gleichen Bedingungen pro Zelle 14 bis 33 Probanden zu nehmen.
- Zur Festlegung des Stichprobenumfangs bei den Studien mit Messwiederholung muss außerdem die Korrelation zwischen den Messzeitpunkten beachtet werden. Geht man von der vorsichtigen Annahme aus, dass die Messreihen etwa zu 0,5 korrelieren und eine zweimalige Untersuchung der Stichprobe geschieht ($df=1$), ergeben sich Stichprobenumfänge von 14 bis 33 Probanden pro Zelle (Bortz & Döring, 2003, S.615).

Daraus ergibt sich für das Untersuchungsdesign, dass man mit einer Zellenbesetzung im Mittel von 22 Probanden sich in einem angemessenen Bereich befindet. Aufgrund von Unbrauchbarkeit einiger Testhefte, möglicher technischer Probleme und Erkrankung von Probanden ist eine geringere Anzahl auswertbarer Datensätze zu erwarten. Deswegen wurde eine höhere Probandenzahl mit $N=135$ als Ausgangsstichprobe realisiert (Abschnitt 8.4).

8.3 Untersuchungsinstrumente

Als abhängige Variable der Untersuchung wird der Wissenserwerb erhoben (Abschnitt 8.3.4). Für eine möglichst hohe interne Validität der Untersuchung (Abschnitt 8.5) müssen alle Einflussfaktoren berücksichtigt werden, die eine systematische Verzerrung der Ergebnisse herbeiführen könnten. Dabei begegnet man zwei konkurrierenden, gegenläufigen Zusammenhängen: Einerseits will man über die Probanden möglichst viel erfahren, andererseits sollen die Probanden nicht unnötig belastet werden, um Ermüdungseffekte auszuschließen. Der Kompromiss besteht darin, dass nur Lernermerkmale erhoben werden, die für die Forschungsfragen unverzichtbar sind. Obwohl die Motivation eine wichtige Voraussetzung für den Lernerfolg ist, wird hier beispielsweise auf eine entsprechende Befragung verzichtet, da es keinerlei Anlass gibt, hier einen Unterschied zwischen den Treatmentgruppen anzunehmen. Aus diesen Gründen werden nur die Personenmerkmale als **Kontrollvariablen** erhoben, die aufgrund von einschlägigen Forschungserkenntnissen, die abhängige Variable beeinflussen (Kapitel 5): räumliches Vorstellungsvermögen und sprachliche Fähigkeiten (Abschnitt 8.3.3), Vorwissen zu den animierten Inhalten und zur Lochkamera (Abschnitt 8.3.4), Bearbeitungszeit (Abschnitt 8.3.5), Selbstkonzept und Selbstwirksamkeitserwartung in der Physik (Abschnitt 8.3.2). Außerdem werden allgemeine Fragen erhoben (z.B. Alter, Geschlecht, liebstes bzw. unbeliebtestes Fach), die zur Beschreibung der Stichprobe herangezogen werden und deren Wirkungen als mögliche Kovariaten untersucht werden (Abschnitt 8.3.1). Die Meinung der Schüler über das Lernprogramm wird mit zwei offenen Fragen erhoben, um ihre Akzeptanz des Lernprogramms abzuschätzen (Abschnitt 9.2). Unter den Testinstrumenten sind sowohl Eigenentwicklungen als auch standardisierte Tests. Die Umsetzung des Datenschutzes bei der Erhebung wird im Abschnitt 8.6.1 beschrieben. Die Ergebnisse sind im Kapitel 9 zusammengefasst.

8.3.1 Allgemeine Fragen, Interesse und Beliebtheit der Physik

Im Rahmen der Untersuchung werden die folgenden personenbezogenen Daten erhoben: Alter, Geschlecht, Physik- und Deutschnote im letzten Zeugnis, Fernsehgewohnheiten zu Sendungen mit physikalischen Themen, beliebteste und unbeliebteste drei Schulfächer (Anhang D.3). Anhand dieser Variablen wird die Stichprobe charakterisiert, weiterhin werden diese Kontrollvariablen dahingehend untersucht, ob sie den Wissenserwerb beeinflussen. Die durchschnittliche Schulleistung von Schülern wird im Spiegel von Schulnoten abgefragt und zwar in zwei Fächern, die für die Untersuchung relevant sind: Physik, weil es sich um physikalische Inhalte handelt; Deutsch, weil beim Schreiben von Notizen sprachliche Fähigkeiten erforderlich sind. Zusätzlich werden zwei Indikatoren abgefragt, die übergreifend die Einstellungen von Schülern zum Physikunterricht bestimmen: Interesse und Beliebtheit. Beide sind eine Mischung aus kognitiven und emotionalen Aspekten, weisen aber unterschiedliche Schwerpunkte auf – deswegen werden beide in das Testinventar einbezogen. Was bedeuten sie in der psychologischen und fachdidaktischen Literatur? Anhand der heuristischen Übersicht

von Starauschek (2001, S.109) kann man das Konstrukt **Interesse** mit folgenden Aspekten beschreiben:

- Es ist eine Beziehung zwischen einer Person und einem wahrgenommener Teil der Umwelt, was auch die Auseinandersetzung mit diesem Gegenstand beinhaltet (Krapp, 1999).
- Es kann kurz-, mittel- und langfristig sein. Das kurzfristige Interesse kann als aufmerksame Zuwendung zu einem Gegenstand verstanden werden, das aber keine weiteren Handlungen auslöst. Das langfristige Interesse kann zu einem Personenmerkmal und, durch eine bewusste Identifikation mit dem Gegenstand, sogar in das Selbstkonzept einer Person integriert werden (Starauschek, 2001, S.108; Wild et al., 2006, S.215). In Bezug auf Physik stellt die IPN-Interessenstudie eine Korrelation der Langfristigkeit mit dem Sachinteresse fest, die Kurz- und Mittelfristigkeit gehört dem Interesse am Schulfach Physik (Hoffmann, Häußler & Lehrke, 1998).
- Das Interesse an physikalischen Inhalten hängt vom Kontext ab, in dem sie dargeboten werden. Ist ein Kontext sinnstiftend bzw. übt er einen positiven Reiz aus, dann wecken die eingebettete Inhalte Interesse bei den Schülern (Muckenfuß, 1995, S.65; Hoffmann, Häußler & Lehrke, 1998).
- Die personengebundenen Aspekte des Interesses sind Aufmerksamkeit, Handeln, Emotionen, Wertzuweisung (Krapp, 1998) und kognitive Repräsentationen physikalischer Inhalte. Im günstigen Fall machen die physikalische Inhalte die Schüler aufmerksam, ihre aktive Handlung (Lernen, Experimentieren) wird mit positiven Emotionen begleitet, der Physik wird von der Schülerseite ein hoher Wert zugewiesen und sie bilden elaborierte Wissensstrukturen. Dieser Prozess zeigt im Idealfall die Interessantheit des Fachs Physik, ist aber in der Realität nur bruchstückhaft vorhanden.

Da der Einsatz von Fragebögen der IPN-Interessenstudie den Rahmen dieser Untersuchung sprengen würde, wird das Interesse an der Physik mit einer Frage nach der Fernsehgewohnheiten zu Sendungen mit physikalischen Themen grob abgeschätzt. Die Schüler haben dann die Möglichkeit zwischen den Ausprägungen „oft – gelegentlich – nie“ zu wählen. Diese Frage tastet auf Grund der Langfristigkeit des Handelns eher das Sachinteresse an der Physik bei den Schülern ab.

Bei dem Konstrukt **Beliebtheit** sind die emotionale Aspekte zentral („affektives Moment“, Brämer, 1977, S.263). Die empirischen Ergebnisse zur Beliebtheit des Schulfachs Physik kann man in groben Zügen so zusammenfassen:

- Physik gehört bei Jungen und erst recht bei Mädchen zu den unbeliebtesten Fächern. Die Beliebtheit und das Interesse an der Physik nehmen mit den Schuljahren ab. Die Beliebtheit liegt aber im Mittel über dem Interesse (Lex & Gunacker, 1998).
- Es zeigen sich zwei Unterschiede zwischen den Geschlechtern (Hoffmann, Häußler & Lehrke, 1998, S.20f): (1) Physik ist bei den Mädchen deutlich unbeliebter als bei den Jungen. (2) Physik gehört bei den Mädchen auch zu den uninteressantesten Fächern. Im Ge-

gensatz dazu ist Physik für die Jungen eines der interessantesten Fächer (!). Eine mögliche Interpretation für dieses Phänomen lautet: Physik ist ein „technisches“ Fach. Die Jungen identifizieren sich stärker mit seinen Inhalten, auch wenn sie Physik nicht zwangsläufig besser verstehen als Mädchen. Ein Indiz für diese Erklärung ist die aus den Misserfolgen ableitbare Unbeliebtheit der Physik auch unter Jungen.

- Trotz der wachsenden Unbeliebtheit bleibt die Beliebtheit des Faches Physik über die Jahre hinweg konstant (5-10%). Brämer (1977, S.265) interpretiert diesen Befund so, dass sich am Anfang des Physikunterrichts eine kleine relativ stabile Gruppe von Schülern bildet, während sich mit der Zeit die andere gleichgültige Mehrheit der Schüler zur Unbeliebtheit entscheidet.

Zur Untersuchung der Beliebtheit des Faches Physik in der vorliegenden Stichprobe wird eine zweiseitige, symmetrische Fragestellung eingesetzt (Muckenfuß, 1995, S.75f): Welches sind deine drei liebsten Schulfächer? Welches sind deine drei unbeliebtesten Schulfächer? Da dies eine assoziative Frage ist, liegt nahe, dass der affektiv-emotionalen Bezug zwischen Schülern und Schulfächern erfasst wird. Es ist weiter anzunehmen, dass mit dieser Frage Fächer erhoben werden, die von Schülern mit extremen Emotionen belegt sind. In beiden Fällen sind drei Fächer gefragt, um asymmetrische Schülerantworten zu vermeiden. Beim alternativ denkbaren Einsatz eines Fragebogens mit Likert-Skala könnte eine stark polarisierte Einstellung der Schüler zu einem Schulfach verborgen bleiben.

Die Untersuchung basiert zwar auf der Bearbeitung des Lernprogramms, jedoch werden zur Nutzung des Computers keine Fragen gestellt. Einerseits sind die Schüler heutzutage mit dem PC sehr vertraut (Wirth & Klieme, 2002), andererseits stellt die lineare Struktur des Lernprogramms im Hinblick auf die Navigation sehr geringe Anforderungen.

8.3.2 Selbstkonzept und Selbstwirksamkeitserwartung in der Physik

In der vorliegenden Untersuchung wird auf einen spezifischen Teilbereich des Selbstkonzepts fokussiert, nämlich auf das „**Selbstkonzept** schulischer Fähigkeiten“ (Shavelson et al., 1976). Es wird weiterhin aus der pädagogisch-psychologischen Literatur ein pragmatischer Ansatz gewählt, anhand dessen man eine *kognitive* und eine *emotionale* Komponente des Selbstkonzepts unterscheidet, wie Selbsteinschätzung und Selbstwertgefühl (Epstein, 1993).

Die **Selbstwirksamkeitserwartung** erfasst die Erwartungen eines Schülers gegenüber sich selbst, inwieweit er im Unterricht situationsadäquat handelt und daraus folgend die Anforderungen (z.B. Leistungskontrollen) bewältigt (Bandura, 1977). In der Schulsituation zeigt sich eine Verwandtschaft zwischen dem kognitiven Aspekt des Selbstkonzepts und dem Konstrukt der Selbstwirksamkeit: Wie schätzt der Schüler seine Fähigkeiten ein, um in einem Schulfach erfolgreich zu sein? Die eigenen Kompetenzen werden gleichzeitig auch affektiv-emotional bewertet, woraus ein Selbstwertgefühl entsteht. Durch die eigene Subjektivität kann eine Über- bzw. Unterbewertung entstehen, was dementsprechend eher positive bzw. negative Emotionen mit sich bringt, die sich wiederum auf die Motivation auswirken (Helmke, 1992a).

Des Weiteren wird unter Selbstkonzept im Schulfach Physik vereinfachend das Selbstvertrauen in die eigene Leistungsfähigkeit verstanden, das sowohl die vorhin aufgeführten kognitiven als auch die emotionalen Aspekte enthält: Was kann ich im Physikunterricht leisten und welches Gefühl löst das in mir aus?

Warum wird gerade diesen Komponenten der Persönlichkeit von Schülern in der vorliegenden Untersuchung Rechnung getragen? Dies liegt daran, dass im fachspezifischen Selbstkonzept geschlechtsspezifische Unterschiede vorliegen (Rustemeyer & Jubel, 1996; Hoffmann, Häußler & Lehrke, 1998, S.65):

- Das Selbstkonzept der Jungen in Mathematik und Physik ist höher als das der Mädchen.
- Mädchen schätzen ihre mathematischen Fähigkeiten niedriger ein als Jungen, auch wenn sie vergleichbare Noten erreichen.

Anhand dessen ist anzunehmen, dass es sich bei dem Selbstkonzept im Schulfach Physik um eine Kontrollvariable handelt. Um die Selbstauskunft von den Schülern zu erhalten, wurde die Selbstkonzeptskala von Helmke (1992b) eingesetzt. Die Skala wird im weiteren abgekürzt als P-Skala bezeichnet (Anhang D.3). Sie besteht aus sechs Items, die strikt als positive oder negative Aussagen formuliert sind. Es wird weiterhin eine vierstufige Likert-Skala mit den Stufen – trifft völlig zu, trifft eher zu, trifft eher nicht zu, trifft nicht zu – verwendet. Die Schüler werden dann die Aussage eines Items um so mehr ablehnen, je weiter ihre Einstellung von der Formulierung des Items abweicht. Mit der geraden Zahl von Antwortmöglichkeiten wird eine mittlere Ausprägung (Neutral-Antworten) vermieden: Die Schüler müssen eine Entscheidung treffen. Den Antworten, die als ordinalskaliert zu betrachten sind, werden natürliche Zahlen zugeordnet, in deren Folge die Antworten auf den Ausprägungsgrad des Selbstkonzepts schließen lassen: Die Punktzahl eines Schülers kann Werte zwischen 24 Punkten (höchstes Selbstkonzept) und 6 Punkten (niedrigstes Selbstkonzept) annehmen.

Die Selbstwirksamkeitserwartung für Physik wird mit der Skala von Jerusalem & Satow (1999, S.15f) gemessen. Sie wird des Weiteren als S-Skala bezeichnet (Anhang D.3). Die Vorgehensweise ist gleich der P-Skala, die Antwortmöglichkeiten sind in der vierstufigen Likert-Skala von „trifft genau zu“ bis „trifft nicht zu“ angeboten. Diese Skala setzt sich aus 7 Items zusammen, dementsprechend kann die Befragung zur Selbstwirksamkeitserwartung Werte zwischen 7 und 28 erreichen.

8.3.3 Testinstrumente für psychologische Konstrukte

Zur Bestimmung der verbalen und räumlichen Fähigkeiten der Schüler zumindest in Teilspekten wird der Kognitive-Fähigkeits-Test (KFT) von Heller & Perleth (2000) eingesetzt. Der Test wird als Gruppentest in den jeweiligen Klassen durchgeführt. Von der elfteiligen Testbatterie werden zwei Subtests ausgewählt, die für die Untersuchung (Text- und Bildverstehen) relevant sind:

- **Figurenklassifikation (N1)**

In diesen Aufgaben (25 Items) ist eine Reihe von drei oder vier Figuren gegeben, die sich nach bestimmten Merkmalen klassifizieren lassen (Form, Lage, etc.). Aus fünf anderen Figuren ist diejenige herauszufinden, die zu der Gruppe der vorgegebenen Figuren gehört. Diese Aufgaben geben Auskunft über ein indikatorisches Bildverstehen der Schüler (Weidenmann, 1988): Sie können die Aufgaben erst lösen, wenn sie die Eigenschaften erkennen, anhand welcher der Bildgestalter die Gruppierung geschaffen hat. Die erforderlichen Fähigkeiten entsprechen also der *Spatial Visualisation* und *Spatial Relation*, die im Sinne dieser Arbeit das räumliche Vorstellungsvermögen ergeben (Abschnitt 5.2).

- **Wortschatz (V1)**

Ein großer Wortschatz ist eine grundlegende Voraussetzung, der das sprachliche und fachliche Verstehen von Lerntexten ermöglicht (Tajmel, 2009b, S.1). Dieser Subtest vermittelt Information über Sprachverständnis, in dem zu einem gegebenen Wort aus einer Reihe von fünf weiteren Wörtern dasjenige herauszufinden ist, das am ehesten zu dem gegebenen Wort passt (25 Items).

Aus diesen Subtests werden die jeweils der Klassenstufe optimal angepassten Testaufgaben ausgewählt, weiterhin wird das Aufgabenheft der Form A gewählt. Die vorgegebene Instruktion zur Lösung des KFT-Tests erhalten die Schüler schriftlich im Testheft, damit jeder in eigenem Tempo arbeiten kann. In der Anleitung wird zwar darauf hingewiesen, dass die Einhaltung der vorgegebenen Bearbeitungszeiten zwingend notwendig sei (Heller & Perleth, 2000, S.94), die Absicht der Untersuchung ist aber keine standardisierte Fähigkeitsmessung. Der KFT wird hier als Kontrollvariable und als Maßstab für die Teilung der Schüler in Gruppen mit niedrigeren und höheren verbalen bzw. räumlichen Fähigkeiten eingesetzt (Abschnitt 9.5, 9.7).

8.3.4 Wissenstests

Da das Vorwissen als starke Moderatorvariable in Bezug auf den physikalischen Wissenserwerb bekannt ist (Abschnitt 5.1), wird eine viermalige Überprüfung des Wissensstandes in einer Datenerhebung mit Vortest, Nachtest 1, Nachtest 2 und Langzeittest stattfinden (Abschnitt 8.6.2). Dabei werden die folgenden drei Wissenstests eingesetzt (Anhang D.4 bis D.6):

- Wissenstest zum ersten und zweiten Teil des Lernprogramms (T_1 , T_2),
- „Spezieller Wissenstest“ (T_3).

Alle drei Tests erfolgen als Erhebungstest, d.h. es wird ohne Zeitlimit gemessen. Um messbare Effekte in den Treatmentgruppen zu erzielen, enthalten die Wissenstests sowohl Behaltens- als auch Transferaufgaben (Sumfleth et al., 2002, S.122). Wenn die Items des Wissenstests Inhalte abfragen, die unmittelbar im Lernprogramm als Bild und/oder Text präsentiert sind, wird die Behaltensleistung der Schüler geprüft. Die Transferleistung kommt wiederum in der Anwendbarkeit des neuen Wissens zum Vorschein.

Exkurs: Behaltens- und Transferleistung

Da die Wissensarten für die vorliegende Arbeit nicht relevant sind, wird auf ihre Erhebung verzichtet. Es wird mit dem Konzept der Lernleistung gearbeitet. Die Lernleistungen „Behalten“ und „Transfer“ entsprechen verschiedenen Verarbeitungstiefen beim Wissenserwerb. In Anlehnung an die Theorie der mentalen Repräsentationen (Abschnitt 1.2) und an Brünken et al. (2001) erscheinen die folgenden engeren Definitionen als tauglich:

- *Behaltensleistung* ist das Einprägen bzw. Memorieren von Inhalten. Es ist im Arbeits- und Langzeitgedächtnis als Netzwerk von „verbalen und piktorialen mentalen Modelle“ repräsentiert.
- *Transferleistung* ist die Fähigkeit das erworbene Wissen auch in neuen oder veränderten Situationen bzw. auf andere Zusammenhänge anzuwenden. Sie erfordert den Aufbau eines „integrierten mentalen Modells“, in dem die vorhandenen Wissensstrukturen aufgrund von neu memorierten Inhalten nachhaltig umstrukturiert und ausdifferenziert werden (Schnotz, 1994).

Ein typisches Phänomen für schulisches Physiklernen ist, dass die Formeln und physikalischen Gesetzmäßigkeiten nur eingeprägt werden, in neuen Kontexten aber nicht einsetzbar sind (Prenzel et. al, 2001). Es findet im obigen Sinne Behalten statt, Transfer dagegen nicht.

Die Wissenstests zum ersten und zweiten Teil des Lernprogramms (T_1 , T_2) sind erprobte Testinstrumente von Starauschek (2006a) im Inhaltsbereich „optische Abbildung“. Da sie keine Eigenentwicklungen sind, werden sie an dieser Stelle nur beschrieben. In den Tests sind drei Antwortformate vertreten: Multiple-Choice, sprachliches und zeichnerisches Antwortformat. Damit können aus der kognitionspsychologischen Perspektive sowohl verbale, als auch piktoriale mentale Modelle von Schüler abgefragt werden (Starauschek, 2003a, S.39). Die folgende Tabelle 8-2 zeigt die Verteilung von Items auf die Antwortformate, sowie die Anzahl von Behaltens- und Transferaufgaben für beide Wissenstests:

Wissenstest T_1		Wissenstest T_2	
Antwortformate	Lernleistung	Antwortformate	Lernleistung
<ul style="list-style-type: none"> • 1 Multiple-Choice-Aufgabe • 4 offene Fragen • 7 Zeichnungen 	Behalten: 5 Items Transfer: 7 Items	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Multiple-Choice-Aufgabe • 7 offene Fragen • 4 Zeichnungen 	Behalten: 6 Items Transfer: 6 Items

Tabelle 8-2: Deskriptive Beschreibung der Wissenstests zum ersten und zweiten Teil des Lernprogramms.

Der Wissenstest zum ersten Teil des Lernprogramms (T_1) enthält fünf Items zur Behaltens- und sieben Items zur Transferleistung. Die Items fragen Inhalte zu dünnem Lichtbündel, Punktlichtquelle, optischer Abbildung mit der Lochblende bzw. Lochkamera ab. Sie wurden aus 16 Items nach der Datenerhebung der Hauptuntersuchung so ausgewählt, dass sie eine in-

haltlich valide und möglichst reliable Skala ergeben (siehe dazu die Tabelle 8-7 im Abschnitt 8.7.2). Es wurden weiterhin eher die offenen Fragen und Zeichnungen behalten, da sie mit mehr Information über den Wissenserwerb der Schüler dienen als Aufgaben mit gebundenen Antwortformat (Multiple-Choice). Die anderen Items finden in der Analyse keine Verwendung. Der Wissenstest zum zweiten Teil des Lernprogramms setzt sich aus sechs Items sowohl zur Behaltens-, als auch zur Transferleistung zusammen. Sie wurden anhand der vorhin genannten Kriterien aus 20 Items ausgewählt. Sie prüfen die folgenden Inhalte ab: Veränderungen des Bildes in Abhängigkeit von der Größe der Lochblende, optische Abbildung mit der Linse, Veränderungen im Bild durch die Verschiebung der Mattscheibe, Streuung.

„Spezieller Wissenstest“ (T₃)

Zielsetzung

Neben dem Hauptthema „optische Abbildung“ sind im Lernprogramm auch weitere Phänomene wie die Lichtausbreitung, der physikalische Sehvorgang und die Streuung thematisiert. Dieses zusätzliche Wissen wird fast ausschließlich in *visueller Form* dargeboten und zwar – je nach Programmversion – mit statischen und/oder dynamischen Bildern (Abschnitt 7.4.2). Textinhalte können an diesen Stellen den Wissenserwerb nicht beträchtlich beeinflussen. Durch die unterschiedliche Visualisierung der Lernprogrammversionen eignen sich die genannten Themen besonders gut, um die Wirkung von Bildern und Animationen auf den Wissenserwerb zu untersuchen: Es wurde der „spezielle Wissenstest“ (T₃) entwickelt, womit *Hypothese 2* (Abschnitt 8.1) geprüft werden kann.

Gütekriterien der Testentwicklung

In der Testentwicklung wird versucht, den Ansprüchen der psychodiagnostischen Testtheorie weitgehend zu entsprechen (Bortz & Döring, 2003, S.193-201). Die Kriterien werden folgendermaßen beachtet:

- *Objektivität* (Beobachterunabhängigkeit) wird realisiert durch die Festlegung der Art und Weise, wie der Test durchzuführen, auszuwerten und das Ergebnis zu interpretieren ist (Abschnitt 8.4-8.7, Kapitel 10).
- *Reliabilität* (Zuverlässigkeit) wird mit der gebräuchlichsten Methode, durch *Cronbach's Alpha-Koeffizient* bestimmt (Abschnitt 8.7.2). Fehlereinflüsse, wie Müdigkeit von Probanden und situative Störungen werden, soweit es möglich ist, ausgeschlossen.
- *Validität* (Gültigkeit) wird im „speziellen Wissenstest“ mit folgenden Methoden realisiert: Es wird eine Inhaltsvalidität gewährleistet, d.h. die aus dem Forschungsinteresse resultierenden visuellen Inhalte des Lernprogramms werden abgefragt (Lichtausbreitung, physikalischer Sehvorgang, Streuung, Tabelle 8-3). Die Items ermöglichen gleichzeitig einen Einblick in die Schülervorstellungen. Der Wissenstest T₃ wird zweifach qualitativ erprobt (siehe unter „Validierende Studien“). Mit einer geeigneten Wahl der Rahmenbedingungen (Ab-

schnitt 8.5) und Homogenisierung der Stichprobe (Abschnitt 8.6.1) wird die Gültigkeit der mit den Untersuchungsergebnissen verbundenen Aussagen weiter steigen.

Itementwicklung

Es werden zunächst eine inhaltliche Sachanalyse des Lernprogramms erstellt und daraus die visuell dargebotene Inhalte eliminiert, d.h. es werden sowohl die Inhalts- als auch die „Codierungsvalidität“ gesichert. Anschließend wird die Grundgesamtheit der Testitems betrachtet: Die Items greifen Inhalte des Lernprogramms unmittelbar auf (Behalten), dann setzen sie die gleichen Inhalte in veränderte Situationen (Transfer). Hinzu kommen Items, die sich an Interviews orientieren, die Schülervorstellungen abtasten (Wiesner, 1986, S.25; Hoffman & Wiesner, 1982, S.301). Weitere Items sind durch Lehrbuchinhalte inspiriert (Herrmann, 1995, S.100ff; Mikelskis & Wilke, 2000, S.13) und die schwierigsten Transferaufgaben fordern die Erklärung von Naturphänomenen (z.B. Warum ist es nicht „Nacht“, wenn sich eine Wolke vor die Sonne schiebt?, Rókáné Kalydi, 1997, S.118). Zu den drei Kernthemen werden mehrere Items mit unterschiedlichen Antwortformaten formuliert. Nach einer Diskussion mit Kollegen wird eine geeignet erscheinende Auswahl von 24 Items als Grundgesamtheit getroffen.

Validierende Studien

In einer qualitativen Interviewstudie wird nachgewiesen, ob der erstellte Wissenstests T_3 für seinen Einsatzzweck geeignet ist (3.Vorstudie, $n=6$, 12-13 Jahre, Gymnasium). Die Interviews sollten über die Verständlichkeit der Testitems eine Auskunft geben. Dieses Interesse lässt sich mit der schon im Abschnitt 7.5 vorgestellten Interviewtechnik verfolgen: Die Probanden arbeiten paarweise mit beiden Teilen des Lernprogramms, danach wird ein kurzes Interview zum Lernprogramm als Ganzes geführt (Leitfaden 2.0, Anhang C.2). Im nächsten Schritt wird der Wissenstest bearbeitet. Anschließend werden die Schüler um Kommentare, zur Verständlichkeit und Eindeutigkeit der Aufgabenstellung bzw. Begründung ihrer Antwortwahl, gebeten. Die Probanden werden weiterhin mit den Widersprüchen konfrontiert, etwa dann, wenn sie unterschiedliche Antworten auf inhaltlich gleiche Items gegeben haben. Dadurch werden sprachliche und visuelle Missverständnisse erkannt, daraufhin die Items präziser formuliert oder neu strukturiert und gegebenenfalls einige Distraktoren bei den Multiple-Choice-Aufgaben geändert. Andere Items erweisen sich möglicherweise als inhaltlich problematisch und werden in der Testerstellung nicht weiter berücksichtigt. Es wird also eine engere Auswahl an Items getroffen.

Die reduzierte und überarbeitete zweite Version des Wissenstests T_3 wird Schülern im Rahmen einer Schulstunde zur Bearbeitung vorgelegt (4.Vorstudie, $n=20$, 7. Klasse, Gymnasium). Da es sich hier um leistungsstarke Schüler handelt, sind diese Probanden vergleichbar mit der Stichprobe der Hauptuntersuchung (8. Klasse, Abschnitt 8.4). Anhand der Lösungswahrscheinlichkeiten p von Aufgaben werden die zu schweren ($p < 0,02$) und zu leichten ($p > 0,08$) Items aussortiert.

Der Wissenstest der Hauptuntersuchung

Die Endversion des Wissenstests T_3 besteht aus elf Aufgaben, die in 24 Items unterteilt sind. Davon sind 14 Items eigene Entwicklungen und 10 Items stammen aus äußeren Quellen (siehe unten „Itementwicklung“), die modifiziert und an das Forschungsvorhaben angepasst sind. Bei der Zusammenstellung der Testitems wurde auch auf die Belastbarkeit der Schüler geachtet: Die Bearbeitungsdauer für den Wissenstest wird nicht vorgegeben, beträgt aber insgesamt ca. 15 Minuten. Auf diese Weise ist das Lernprogramm mit dem Wissenstest in einer Schulstunde zu meistern. Jede Aufgabe des Wissenstests ist mit schwarz-weiß Zeichnungen versehen. Ihre Gestaltung orientiert sich an den Bildern des Lernprogramms. Dadurch werden die gleichen visuellen Voraussetzungen für den Abruf des Wissens geschaffen, die beim Lernen vorhanden sind. Dies kann zu einer besseren Lernleistung führen als bei einer Testversion ohne Bilder (Weidemann, 2002, S.51f).

Um die Auswertung und Kodierung der Aufgaben zu erleichtern, wird größtenteils ein gebundenes Antwortformat bereitgestellt (16 Items bei neun Aufgaben). Hier befinden sich unter den Antworten sowohl Distraktoren als auch eine richtige Antwort. Zu jedem Themengebiet werden auch Aufgaben mit offenem Antwortformat gestellt, die eine sprachliche Formulierung ($n=5$) bzw. eine Zeichnung ($n=3$) verlangen. Diese offenen Antwortformate erfassen, wie die Schüler von sich aus antworten. Das schließt das Raten aus und öffnet die Tür zur Erkundung ihrer Vorstellungen. Dieses Verfahren ist analog zur so genannten internen methodologischen Triangulation der qualitativen Forschung (Mayring, 1990a, 103f). Eine genaue Übersicht der Verteilung von Antwortformaten in verschiedenen Themen liefert die folgende Tabelle 8-3:

	Lichtausbreitung	Physikalischer Sehvorgang	Streuung
Multiple-Choice	11	-	5
Zeichnung	-	2	1
Offenes Antwortformat	1	2	2
Behalten	1	-	2
Transfer	11	4	6

Tabelle 8-3: Anzahl der im Antwortformat unterschiedlichen Items zu dem jeweiligen Thema des Lernprogramms sowie die Anzahl von Behaltens- und Transferitems.

Die Anzahl von Items variiert von Thema zu Thema: Beim Thema des physikalischen Sehvorgangs sind vier Items ausreichend, bei demjenigen der Lichtausbreitung hingegen werden zwölf Items benötigt. Wegen der hauptsächlich visuellen Darstellung dieser Themen im Lernprogramm hat der größte Teil der Items ($N=21$) einen Transfer-Charakter. Nur drei Items mes-

sen die Behaltensleistung von Schülern. Zu ihrer Lösung wird die benötigte Information im Lernprogramm in expliziter Form in Text und Bild dargeboten.

Zwischen der Theorie der mentalen Repräsentationen (Abschnitt 1.2) und der Konstruktion der Aufgaben des Wissenstests werden Analogien ersichtlich: Mit den sprachlichen Antwortformaten, die eine Behaltensleistung verlangen, werden die „verbalen mentalen Modelle“ untersucht. Aufgaben, die eine Transferleistung erfordern, zielen auf die „integrierten mentalen Modelle“ (Staraschek, 2003a, S.42, 46). Die Bildung von „verbalen und piktorialen mentalen Modellen“ (Behaltensleistung) kann in diesem Zusammenhang als Vorstufe zur Bildung von „integrierten mentalen Modellen“ (Transferleistung) gedeutet werden. Wichtige Konzepte werden aus diesem Grund mit mehreren Antwortformaten und auf unterschiedlichen Leistungsebenen abgefragt, um möglichst alle mentalen Repräsentationen von Schülern zu erfassen und damit ein vollständiges Bild über deren Wissenserwerb zu erhalten.

Die Items werden so angeordnet, dass erstens keine Positions- und Reihenfolgeeffekte zu erwarten sind (Rost, 1996, S.74) und zweitens sich verschiedene Antwortformate abwechseln. Der Wissenstest fängt mit einem leichten, motivierenden Item an, dann folgen anspruchsvollere Aufgaben mit offenem Antwortformat, die sich mit Multiple-Choice-Aufgaben abwechseln. Am Ende des Tests sind nur noch Multiple-Choice-Items zu lösen. Dieses Verfahren versucht der sinkenden Motivation im Verlauf der Testlösung entgegenzuwirken. Im Wissenstest wird außerdem eine verhältnismäßig leichte Aufgabe zur geradlinigen Lichtausbreitung gestellt, um messen zu können, wie hoch die Motivation der Schüler in der Stichprobe ausgeprägt ist (Aufgabe 6). Wenn diese Aufgabe von mehreren Probanden nicht gelöst wird, deutet dies auf eine geringe Motivation während der Untersuchung hin, was bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden soll. Die gleiche Aufgabe wird auch mit einer komplexeren Visualisierung gestellt (Aufgabe 10), um einzuschätzen, wie verwirrend oder plausibel die visuelle Darstellung der Lichtausbreitung im hybriden Wellenmodell ist. Der Wissenstest wird zu drei Testzeitpunkten eingesetzt (Pre - Post - Follow-up, Abschnitt 8.6).

8.3.5 Logfiles

Die Interaktion zwischen den Schülern und dem Medium (Computer, siehe Abschnitt 1.1) kann mit automatisch generierten elektronischen Protokollen aufgezeichnet werden. Die Interaktion bezeichnet das Verhalten der Schüler in der multimedialen Lernumgebung, das mit Hilfe von Logfiles erfasst und gespeichert werden kann, worauf eine genauere Analyse folgt. Im akademischen Umfeld hat sich der Begriff „Logfile“ für diese elektronischen Nutzerprotokolle durchgesetzt. Es finden sich Anwendungen in der Psychologie, der Erziehungswissenschaften, der Informatik, usw. In der Fachdidaktik Physik hat Priemer (2004, S.130ff) als einer der Ersten diese Methode zur Analyse der Internetnutzung herangezogen.

Da Logfiles in der vorliegenden Arbeit nur eine ergänzende Analyse darstellen, werden nur diejenigen Aspekte erläutert, auf welche die Untersuchung zurückgreift. Die vorliegende Untersuchung lässt sich nach Roßmanith (2001, S.132) als *n:1*-Betrachtung auffassen: Eine bestimmte Anzahl Probanden ($n=102$) nutzt *eine* Anwendung, ein Lernprogramm. Logfile-Ana-

lysen haben viele Vorteile (große Anzahl von Probanden; unbemerkte Aufzeichnung; objektive, genaue Erfassung; leichte technische Realisierung), aber man sollte sich auch über die Grenzen des Verfahrens bewusst sein: Es handelt sich dabei lediglich um Protokolle von Aktivitäten, die ein Nutzer am PC durchgeführt hat, nicht um den direkten Nachweis von Denkprozessen oder lernbegleitenden Handlungen wie Suchen, Warten, Notieren. Die Aufnahme und Auswertung der Logfiles erfolgen nach folgenden Schritten (Wilde et al., 2002):

- Zur **Aufnahme** der Logfile-Daten wird die Software des Lernprogramms erweitert. Durch diese Ergänzung erzeugt das Lernprogramm im Laufe der Computernutzung eine Datei, die ein Protokoll aller Aktionen der Schüler (z.B. Vor- und Rückwärtsgehen im Lernprogramm, das Starten von Animationen und das Anklicken der Textseite) und ihre Verweildauer an der jeweiligen Seite enthält.
- **Datenauswahl:** Die Schüler und entsprechende Sitzungen werden identifiziert. Es werden der reduzierten Stichprobe (Abschnitt 8.7.2) entsprechende Logfiles in die Analyse einbezogen. Dies bedeutet, dass 100 Datensätze für den erste Teil des Lernprogramms und 102 Datensätze für den zweiten Teil in die Analyse einzubeziehen sind. In der ersten Treatmentphase gingen zwei Logfiles bei der Datenaufnahme verloren.
- **Datenaufbereitung:** Die umfangreichen Rohdaten aus dem Lernprogramm werden mit Hilfe von Visual-Basic-Makros in Tabellen konvertiert, die anschließend mit der Kalkulationssoftware *Microsoft Excel* ausgewertet werden. Als Ergebnis dieser Phase entstehen umfangreiche Excel-Tabellen und Diagramme.
- Die **Datenintegration** führt zur Gruppierung der Daten in den folgenden Vergleichsgruppen: Bild vs. Animation, Notizen vs. keine Notizen, Mädchen vs. Jungen.
- **Mustersuche:** Innerhalb der gebildeten Gruppen werden Einzelereignisse ausgewertet, indem Häufigkeiten und Zeiten für verschiedene Seitentypen erfasst werden. Dabei ist es sowohl möglich die Verläufe der Aktivitäten einzelner Schüler auszuwerten, als auch Gruppenmittelwerte und -verhaltensweisen zur Analyse heranzuziehen.
- **Interpretation:** Die aus der Mustersuche gewonnenen Erkenntnisse werden zur weiterführenden Interpretation der Ergebnisse herangezogen (Abschnitt 9.4, 9.5.1, 9.6, 9.7.1).

Häufigkeiten und Verweildauer tragen dazu bei, das Nutzerverhalten quantitativ zu erfassen. Da es sich hier um ein konkretes lineares Lernprogramm handelt, sind zur Interpretation von Nutzerverhalten diese statistischen Daten ausreichend. Im Falle von Internetnutzung und Hypermedia-Anwendungen wären weiteren Analysen nötig, wie z.B. die Untersuchung der Linearität der Seitenfolgen und die Feststellung von möglichen Lernertypen (Priemer, 2004). Von den im Verlauf der Intervention erhobenen Prozessdaten haben sich die folgenden deskriptiven Variablen herauskristallisiert: **Häufigkeiten** (Anzahl der Seitenbesuche und wiederholten Startvorgänge von Animationen) und **Zeitmessungen** (Bearbeitungszeit des Lernprogramms, Verweildauer pro Seite).

Von diesen Rohdaten werden die Gesamtzeiten für bestimmte Handlungen der Schüler berechnet. So steht

- $t_{\text{Hören}}$ für die mit dem Anhören der Lerninhalte verbrachte Zeit,
- t_{Lesen} für die auf der Textseite, wahrscheinlich mit Lesen verbrachte Zeit,
- $t_{\text{Animation}}$ für die gesamte Betrachtungszeit von Animationen (sowohl die „Pflichtzeit“ als auch die Betrachtungszeit von den aus selbstständig neugestarteten Animationen).

Die auf der Auswahlseite (Abschnitt 7.3) verbrachte Zeit ($t_{\text{Auswählen}}$) wird nicht thematisiert, da die Schüler dort hauptsächlich mit Navigieren beschäftigt sind. Trotzdem wird diese Zeit in die gesamte Lernzeit eingerechnet, weil die Lerninhalte auf dieser Seite in grafischer Form entweder bewusst oder mit dem peripherischen Sehen wahrgenommen werden. Dies gilt auch, wenn es sich nur um eine Sekunde Aufenthaltszeit handelt. Innerhalb von dieser Zeit ist das Auge zu drei Fixationen fähig, d.h. drei Punkte der Grafik können mit fokussiertem Blick wahrgenommen werden. Da die Bilder den Schülern zu diesem Zeitpunkt bereits bekannt sind, reicht dies aus, um die im Gehirn gespeicherten Bilder zu aktivieren.

Es können zwar – wie oben erwähnt – verschiedene Handlungen der Schüler (Anfertigen von Notizen, Nachdenken, ...) nicht direkt durch Logfiles nachgewiesen werden, trotzdem liefert dieses Verfahren wichtige Hinweise zur Deutung der erhaltenen Ergebnisse. Einige dieser Variablen (z.B. die Bearbeitungszeit) werden zu wichtigen Kontrollvariablen. Der potentiell störende Effekt von der durch die Anfertigung von Notizen erhöhten Bearbeitungszeit kann dadurch in der Auswertung eliminiert werden. Zeitunterschiede entstehen aber auch bei der Betrachtung von statischen und dynamischen Visualisierungen. Standbilder werden in der Regel deutlich länger betrachtet als eine Animation (Höffler, 2007, S.60). In der vorliegenden Studie sind die Betrachtungszeiten der Bilder und Animationen auf der „Hörseite“ vorher durch die Programmierung festgelegt. Auf der Lese- und Auswahlseite steht es den Schülern jedoch frei, die Zeit für die Betrachtung selbst zu wählen.

8.4 Stichprobe

An der Untersuchung nahmen insgesamt 135 Schüler der 8. Klasse (Sekundarstufe I) aus drei Brandenburger Gymnasien teil: eine Klasse des Leibnitz-Gymnasiums in Potsdam und jeweils zwei Klassen aus dem Weinberg-Gymnasium in Kleinmachnow und aus dem Ernst-Haeckel-Gymnasium in Werder. In der Stichprobe findet sich also eine Stadtklasse, ansonsten überwiegend Klassen aus dem ländlich-kleinstädtischen Bereich. Dementsprechend ist auch der Anteil von Schülern nichtdeutscher Herkunft minimal.

Da die Probanden dem brandenburgischem Lehrplan entsprechend schon systematischen Unterricht über die Optik in der 5/6 Klasse erhalten haben (Abschnitt 6.1), ist ihnen der Gegenstand nicht vollkommen unbekannt. Von einer Expertise kann man aber ebenfalls nicht ausgehen, weil die Schüler lediglich mit einigen Grundlagen der Optik bekannt gemacht worden sind. Es handelt sich bei dieser Stichprobe also überwiegend um Novizen (Friege, 2001,

S.14). Die Unterrichtsformen an die die Schüler gewohnt sind, sind nach Befragung der Physiklehrer und Physiklehrerinnen als vergleichbar einzustufen. Es ist von einer überwiegend frontal gestalteten Unterrichtssituation auszugehen. Alle Klassen werden in der Physik zweistündig unterrichtet. Die Probanden nehmen freiwillig an der Untersuchung teil und müssen dafür keine spezifischen Voraussetzungen erfüllen. Die mit der Teilnahme an der Untersuchung verbundene Belastung ist verhältnismäßig gering, da die Studie in den jeweiligen Herkunftsschulen im Rahmen des Physikunterrichts stattfindet.

Welche Merkmale die Treatmentgruppen aufweisen sollen, um die Lernwirksamkeit von Bildern, Animationen und Notizen untersuchen zu können, wird in Abschnitt 8.6.1 thematisiert. Die Zusammensetzung der Stichprobe zu allen Testzeitpunkten wird in Abschnitt 8.7.2 beschrieben.

8.5 Rahmenbedingungen der Hauptuntersuchung

Eine Grundentscheidung für den Entwurf einer empirischen Untersuchung ist diejenige zwischen den Möglichkeiten interner und externer Validierung (Bortz, 2005, S.7ff). Diese Entscheidung beeinflusst den Ort und damit auch die Rahmenbedingungen der Hauptuntersuchung.

Einer *Laboruntersuchung* gewährt ein hohes Maß an Kontrolle der Variablen, insbesondere können Störungen auf ein Minimum reduziert werden. Das parallele Auftreten bestimmter Effekte ist gut beobachtbar, sodass die Voraussetzungen dafür, eine Kausalität zu erkennen, in hohem Maße erfüllt sind. Die Entwicklung einer Interpretation läuft daher wenig Gefahr, sich als Auswahl unter mehreren, scheinbar gleichberechtigten Alternativen darzustellen und damit zweideutig zu sein. Damit sind wichtige Ansprüche an eine Grundlagenforschung zu Lernprozessen erfüllt. Andererseits können die beobachteten Ergebnisse unter schulischen Bedingungen eine andere Bedeutung erhalten, wenn die unter Laborbedingungen kontrollierten Störfaktoren verstärkt auftreten. Damit steht auch die Gültigkeit der unter Laborbedingungen gewonnene Interpretation in Frage.

Eine *Felduntersuchung* entspricht den natürlichen Bedingungen, sie weist dadurch eine hohe externe Validität auf. Dies macht es möglich, dass die in der Stichprobe beobachteten Effekte auf andere Schüler, Situationen und Zeitpunkte generalisiert werden können, d.h. eine Relevanz im schulischen Lernen besitzen. Ein Problem liegt allerdings in den schwer nachvollziehbaren Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen in der komplexen Wirklichkeit, da die beobachteten Effekte nicht eindeutig auf kontrollierte Bedingungen zurückgeführt werden können. Damit läuft die Felduntersuchung Gefahr, Fehlinterpretationen der Ergebnisse zu begünstigen. Hinzu kommt, dass die die Wiederholbarkeit des Experiments im Feld erschwert ist.

Damit ist das Bereich abgesteckt, innerhalb dessen ein sinnvoller Kompromiss gefunden werden muss. Ähnlich wie bei Laboruntersuchungen werden hier Personenmerkmale der Schüler erhoben und damit ein Ensemble von Kontrollvariablen aufgenommen (Abschnitt 8.3). Wie im Labor arbeiten die Schüler auch in dieser Untersuchung am Einzelplatz. Dabei wird ver-

sucht, die Einwirkung von anderen Mitschülern auszuschließen. Die Sitzungen werden von der Autorin und von geschulten Untersuchungsleiterinnen durchgeführt, wodurch der Ablauf und die äußeren Bedingungen weitgehend konstant gehalten werden. Die Daten werden in standardisierter Weise erhoben, sodass die Messung intersubjektiv nachprüfbar wird. Die beteiligten Lehrkräfte unterstützen die Autorin in der Organisation (Klärung von Raumfragen, technischen Mittel, ...), jedoch finden die Sitzungen ohne die Lehrperson statt.

Wie im sonstigen Unterricht auch, ist die Teilnahmebereitschaft der Probanden unterschiedlich (Freiwilligkeit), sodass das unterschiedliche Ausmaß der Motivation, die sie für die Untersuchung mitbringen, als Abbild der Schulwirklichkeit gesehen werden kann (Abschnitt 8.6.1). Den natürlichen Bedingungen entsprechen also die unterschiedlich ausgeprägte Motivation der Schüler und der Lernort. Alle Phasen der Untersuchung werden in den regulären Physikunterricht eingebunden. Die Schüler arbeiten in ihren Klassenräumen bzw. in den ihnen bekannten Computerräumen. Sie bleiben damit weiterhin in ihrem gewohnten sozialen Umfeld (Mitschüler, Klassenstruktur). Die Vergleichsuntersuchung ist also quantitativ unter *quasischulischen Bedingungen* als Einzelplatzuntersuchung angelegt. Dadurch wird eine Übertragung der gewonnenen Ergebnisse auf das schulische Lernen möglich und die praktische Relevanz der Ergebnisse für den Physikunterricht erhöht.

Die Kontaktaufnahme zu den Schulen erfolgt zuerst über die Physiklehrer und Physiklehrerinnen. Im nächsten Schritt wird eine Voranfrage an die Schulleiter geschickt, in dem das Forschungsvorhaben, die Inanspruchnahme der Kinder (Zeitaufwand) und der dazugehörige Datenschutz beschrieben werden. Im Fall einer Zustimmung der Schulleitung folgt eine persönliche Vorstellung des Lernprogramms und des Forschungsvorhabens in den Fachkonferenzen. Daraufhin geschieht die Kontaktaufnahme zu den Klassen. Im Vorfeld der Untersuchung werden die Eltern um eine Erklärung zur Einwilligung über die Teilnahme ihres Kindes am Forschungsvorhaben gebeten. Damit wird ersichtlich, dass die äußeren Faktoren nur bedingt beeinflusst werden können: Es haben sich nur einige Gymnasien bereit erklärt, an der Studie teilzunehmen. Weiterhin wurde die Klassenwahl von der Schulleitung getroffen. Es konnten also zum Beispiel nicht alle achten Klassen in einer Schule untersucht werden, was die Qualität der Stichprobe mit Blick auf die Generalisierbarkeit der Ergebnisse erhöht hätte.

Es wurde darauf geachtet, die Untersuchung in der ersten, zweiten bzw. dritten Schulstunde durchzuführen, um Störungen durch Ermüden gering zu halten. Die Untersuchung wurde als *Blindstudie* angelegt, das heißt, dass die Schüler nicht wussten, ob sie der Experimental- oder der Kontrollgruppe angehören. Dadurch wurde der Einfluss von Erwartungen und Verhaltensweisen eliminiert, welche durch diese Information möglicherweise ausgelöst worden wären.

8.6 Ablauf der Hauptuntersuchung

8.6.1 Vortest und Homogenisierung der Stichprobe

Die Zuordnung der Probanden zu den vier Treatmentgruppen hat Bedeutung für die interne oder externe Validität der Untersuchung (Abschnitt 8.3.4, 8.5, Bortz & Döring, 2003, S.58). Durch die Verteilung der Probanden soll die Wahrscheinlichkeit verringert werden, dass der, in einem Signifikanztest nachgewiesene, Effekt einer systematischen Verzerrung unterliegt. Dies wird folgendermaßen realisiert:

Bezüglich ausgewählter Kontrollvariablen (Kapitel 5, Abschnitt 8.3.3-4) – Vorwissen, räumliches Vorstellungsvermögen, sprachliche Fähigkeiten und Geschlecht – werden die vier Treatmentgruppen geschichtet. Innerhalb dieser Schichtung wird ein randomisiertes Verfahren zu der (zufälligen) Verteilung von Probanden durchgeführt. Mit der Homogenisierung der Gruppen wird erreicht, dass diese Merkmale in einzelnen Treatmentgruppen tatsächlich im Mittel gleich ausgeprägt sind. Hinsichtlich dieser Kontrollvariablen werden Schülergruppen gebildet, die sich nicht statistisch unterscheiden. Der Vortest (Anhang D.3, D.6) enthält dementsprechend allgemeine Fragen, zwei Fragen zum Aufbau und zur Funktionsweise der Lochkamera mit offenem Antwortformat, Items des „speziellen Wissenstests“ (T_3 , Abschnitt 8.3.4) und Items des kognitiven Fähigkeitstests zum räumlichen Vorstellungsvermögen und zu den sprachlichen Fähigkeiten (KFT N1 und V1, Abschnitt 8.3.3). Damit entstehen fünf Kategorien der Kontrollvariablen als Merkmale für die Probandenverteilung (Tabelle 8-4). Das Vorwissen zur Lochkamera und das „spezielle Vorwissen“ werden als zwei eigenständige Kategorien bei der Homogenisierung der Stichprobe berücksichtigt, weil sie nicht miteinander korrelieren.

Die Datenerhebung verläuft in dem jeweiligen Klassenraum nach einer einführenden Instruktion (Anhang D.1): Die Testhefte werden verteilt und innerhalb einer Unterrichtsstunde bearbeitet. Beim ersten Test werden die Probanden aufgefordert, sich eine persönliche Codennummer auszudenken und zu merken. Diese Codennummer dient zur Wahrung der *Anonymität* als Namensersatz und wird von den Probanden bei allen Tests auf dem Testheft notiert, sodass eine eindeutige Zuordnung der Meßwiederholungen zu den Personen möglich ist.

Nach der Bildung von Summenscores wird versucht – der Anzahl der Treatmentgruppen entsprechend – immer vier Schüler zu finden, die den gleichen Summenscore bzw. die gleiche Codierung (m vs. w) in den fünf Kategorien haben. Sie werden dann in die unterschiedlichen Gruppen zufällig eingeteilt. Die genaue Übereinstimmung zwischen den einzelnen Probanden der Treatmentgruppen gelang hinreichend gut, sodass eine Parallelisierung der Gruppen im Sinne von Bortz & Döring (2003, S.527) durchgeführt werden konnte: Die Treatmentgruppen sind in Hinsicht auf die fünf Kontrollvariablen im Mittelwert statistisch gleich und insofern *homogen*. Die Versuchsgruppen werden mit dem nichtparametrischen Kruskal-Wallis-Test auf die Homogenität geprüft, der für alle Kontrollvariablen ein nichtsignifikantes Ergebnis ergibt (Tabelle 8-4): Die Gruppen unterscheiden sich also nicht voneinander. Es wird ein hohes Maß an Homogenität der Versuchsgruppen erreicht (hohe Signifikanzwerte), sodass

sicher gestellt ist, dass die Gruppen nach allen Testzeitpunkten und der Datenreinigung weiterhin statistisch gleich bleiben (Abschnitt 9.1).

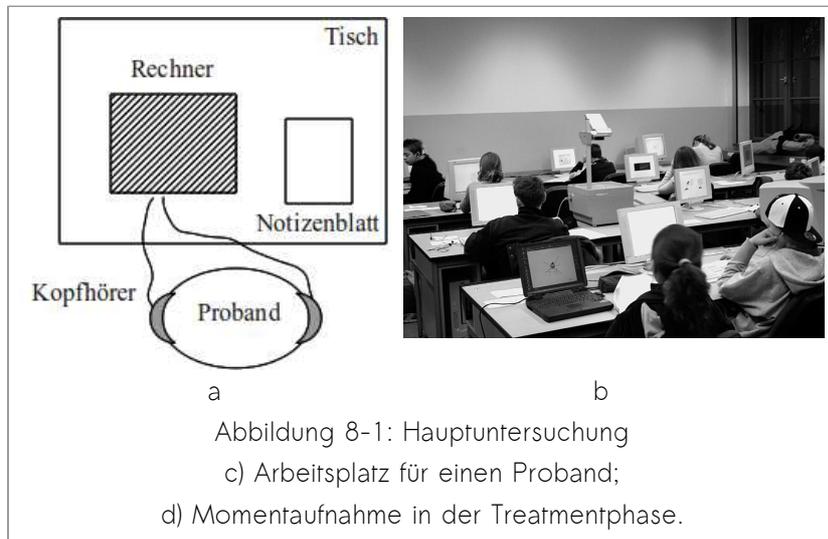
N $\Sigma=135$	Vorwissen zur Lochkamera	Spezieller Wissenstest T ₃	Räumliches Vorstellungsvermögen	Sprachliche Fähigkeiten	Anzahl von Mädchen und Jungen
Signifikanzen	0,988	0,966	0,951	0,937	0,793

Tabelle 8-4: Signifikanzen der Gruppenhomogenität von fünf entscheidenden Kontrollvariablen.

8.6.2 Treatmentphase und Langzeittest

Die Forderung nach einer Homogenität der Treatmentgruppen führte zu erhöhten organisatorischen Anforderungen bei der Durchführung der Untersuchung. Innerhalb der Schulklassen saßen nämlich Schülergruppen mit unterschiedlichen Treatments. Die Klassen wurden deshalb im ersten Schritt in zwei Gruppen „Notizen“ vs. „keine Notizen“ aufgeteilt, die dann in unterschiedlichen Computerräumen saßen. Es wurde ein Sitzplan erstellt und dementsprechend wurden die Arbeitsplätze mit den Codenummern versehen. Im nächsten Schritt wurde für jeden Probanden der Gruppenzugehörigkeit „Bild“ vs. „Animation“ entsprechend die Bild- bzw. Animationsversion des Lernprogramms auf dem Rechner bereitgestellt.

An jedem Arbeitsplatz wurde ein Kopfhörer zur Verfügung gestellt, damit die Probanden einander akustisch nicht störten. Der Notizen-Gruppe wurden die halbstrukturierten Notizenblätter ausgelegt (Abschnitt 4.2, Anhang D.2). Die Testbatterien wurden als gebundene Testhefte vorgelegt. Im Laufe der Untersuchung wurden das Schülerverhalten,



den, die technischen Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und eventuelle Störungen protokolliert (Anhang D.1). Im Hinblick auf das Schülerverhalten beim Lernen handelt es sich hier nur um allgemeine Eindrücke und keine systematische Beobachtung.

Die Untersuchung verlief in drei Abschnitten, die im Hinblick auf die Zusammensetzung der Wissenstests in allen drei Testzeitpunkten (Pre - Post - Follow-up) in der Abbildung 8-2 dargestellt sind. Die drei Etappen waren:

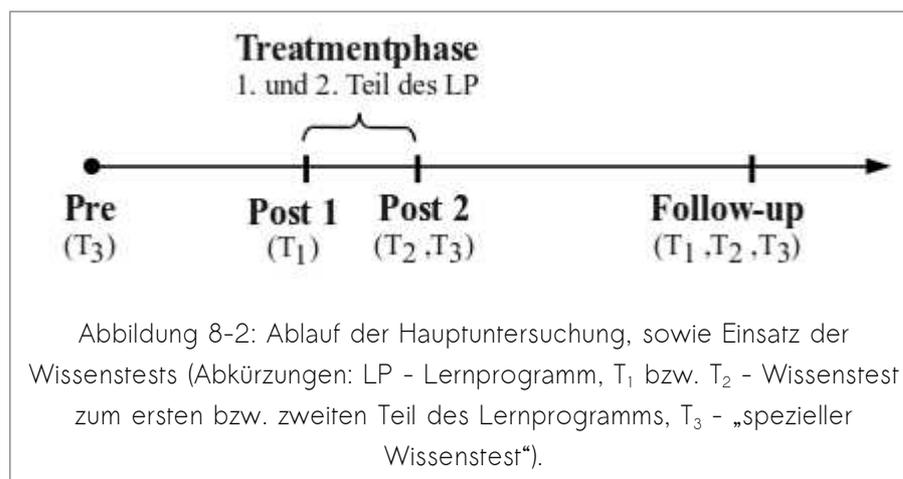
1. Bearbeitung des Vortests (Abschnitt 8.6.1)

2. Bearbeitung des Lernprogramms (Treatmentphase) und des Nachttests

Nach einer kurzen Instruktion (Anhang D.1) bearbeiteten die Schüler in zwei Sitzungen die zwei Teile des Lernprogramms (und fertigten Notizen an, Abbildung 8-1). Unmittelbar im Anschluss an das Lernen mit dem jeweiligen Teil des Lernprogramms erhielten die Schüler Nachttest 1 bzw. Nachttest 2, der sowohl Auskunft über eine allgemeine qualitative Bewertung des Lernprogramms gibt, als auch eine Messung des Wissenserwerbs vorsieht (T_1 bzw. T_2 , Abschnitt 8.3.4, Anhang D.4 bzw. D.5). Der zweite Teil des Lernprogramms wurde eingesetzt, um die Wiederholbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen, d.h. um die im ersten Teil gefundene Ergebnisse zu replizieren. Der „spezielle Wissenstest“ (T_3) ist zum Nachttest 2 hinzugefügt worden.

3. Bearbeitung des Langzeittests

Exakt sechs Wochen nach der Lernphase, also zu einem Zeitpunkt, an dem schon Langzeiteffekte zu messen sind, wurde das Wissen der Schüler über den Inhalt des Lernprogramms erneut erhoben. Der Zeitaufwand betrug 20 bis 35 Minuten. Der Langzeittest enthielt alle Teile des Wissenstests (T_1 , T_2 , T_3) in einem Testheft. Der Wissensstand der Probanden wurde also zu vier verschiedenen Zeitpunkten überprüft.



Um zu vermeiden, dass der Vorwissenstest die Funktion eines *advance organisers* für den Wissenserwerb in der Hauptuntersuchung übernimmt, war ein gewisser zeitlicher Abstand (ein Monat) zwischen dem Vorwissenstest und der Untersuchung notwendig. Da der Physikunterricht in den erwähnten Schulen für die Achtklässler zweimal wöchentlich stattfindet, betrug die Treatmentphase für die gesamte Stichprobe lediglich zwei Wochen. Die Hauptuntersuchung erstreckte sich damit auf die Zeiträume: Anfang November (Vortest), von Ende November bis Mitte Dezember (Lernexperiment) und Ende Januar (Langzeittest).

8.7 Auswertungsverfahren

8.7.1 Kategorisierung und Kodierung der Items des Wissenstests

Bevor der Wissenstest der Hauptuntersuchung quantitativ ausgewertet werden kann, müssen die Schülerantworten zu den Items kategorisiert und kodiert werden. Da die Wissenstests zum ersten und zweiten Teil des Lernprogramms (T_1 , T_2) erprobte Instrumente sind (Abschnitt 8.3.4), werden deren Kategoriensysteme mit neuen Schülerantworten lediglich ergänzt. Im Unterschied dazu müssen zu dem „speziellen Wissenstest“ (T_3), der eine Eigenentwicklung ist, Kategoriensysteme der Schülerantworten erstellt werden. Dabei geht man den unterschiedlichen Antwortformaten entsprechend unterschiedlich vor.

Bei den *Multiple-Choice-Aufgaben* wird die folgende Kodierung verwendet: richtige Antwort (1), falsche Antwort (0), „ich weiß nicht“ (99), Doppelantwort (2) und keine Antwort (fehlende Wert). Mit der Antwortmöglichkeit „ich weiß nicht“ kann eine gefestigte falsche Vorstellung der Schüler von seiner Unsicherheit bezüglich der Antwort unterschieden werden. Damit wird versucht, das Raten von Probanden auszuschließen. Im nächsten Schritt werden der richtigen Antwort 1 Punkt, der falschen bzw. unsicheren Antworten 0 Punkte zugeordnet (Rost, 1996, S.88). Doppelantworten werden grundsätzlich *konservativ* kodiert, d.h. es wird immer der niedrigere Wert gegeben.

Für die *Zeichnungen* werden Punkte in Abhängigkeit davon vergeben, ob sie vollständig richtig (2 Punkte), teilweise richtig (1 Punkt) oder vollständig falsch (0) angefertigt werden.

Die Kategorienbildung von schriftlichen Aussagen des *offenen Antwortformats* wird nach Maßgaben der qualitativen Inhaltsanalyse (Mayring, 2000) vorgenommen. Zunächst werden die Schülerantworten zu den einzelnen Testitems gesammelt, zu inhaltlich ähnlichen Antworten gruppiert und auf die relevanten Aussagen hin reduziert: Bedeutungstragende Aussagen werden ausgewählt und so paraphrasiert, dass man sie auch ohne die Fragen des Wissenstests verstehen kann. Diese Kategorisierung entspricht einem induktiven Verfahren, das sich jedoch an den erwünschten richtigen Antworten, an Teillösungen, aber auch an Alltagsvorstellungen (Abschnitt 6.2) orientiert. Eine Kategorie erhält ihren Namen durch eine *Paraphrase* der typischen Schülerantwort. Bei Aufgabe 2a (Anhang D.6) wäre beispielsweise „Die Lichtstrahlen der Sonne treffen auf das Auge“ eine Paraphrase, welche mit einem *Ankerbeispiel* „Von der Sonne gehen Lichtstrahlen aus, die das Auge des Kindes wahrnimmt“ ergänzt ist. Schülerantworten, die plausibel (z.B. „hatten wir noch nicht“) oder unverständlich sind, werden der Kategorie „Sonstiges“ zugeordnet. Die Kategorien werden mit Nummern versehen, die die physikalische Richtigkeit der Kategorie ausdrücken: höhere Zahlen entsprechen den physikalisch passenderen Kategorien. Doppelzahlen bezeichnen die Unterkategorien, wobei dabei die erste Ziffer auf die Hauptkategorie hindeutet.

Die Dateneingabe wurde von der Autorin und einer studentischen Hilfskraft durchgeführt. Da es sich um keine niedrig inferenten Kategorien handelt, sind Abweichungen zwischen den Zu-

weisungen, die durch unterschiedliche Kodierer vorgenommen werden, noch kein Indiz für ein grundsätzlich fehlerhaftes Vorgehen: Bei einer zufälligen, zehnpromzentigen Auswahl der Prüfdaten aller Testhefte, gelten Abweichungen der Eingaben in der Größenordnung von 1% pro Item noch als akzeptabel (*Signierobjektivität*, Rost, 1996, S.85f). Die zu prüfenden Testhefte (14 Stück bei der Gesamtstichprobe von 135 Probanden) werden zufällig ausgewählt. Die Dateneingabe muss wiederholt werden, wenn mehr als ein Fehler ($1,35 \approx 1$) pro Item gefunden wird.

Im nächsten Schritt werden die Kategorien umkodiert, d.h. die Werte „richtig=1“ und „falsch=0“ hinzugefügt. Eine konservative Kodierung wird im Fall eines offenen Antwortformats auf folgende Weise umgesetzt: In Zweifelsfällen wird die niedrigere Kategorie angenommen und bei der Umkodierung „falsch=0“ eingetragen. Ungenaue Antworten werden ebenfalls als „falsch=0“ kodiert.

Durch diese Kodierung und Punktverteilung in den unterschiedlichen Antwortformaten wird eine Summenscore- und Mittelwertbildung für die Treatmentgruppen möglich. Der Summenscore gibt dabei an, welche Gesamtpunktzahl eine einzelne Person im Wissenstest erreicht (Rost, 1996). Es werden Summenscores für Behaltens-, Transfer- und Gesamtleistung zu allen Testzeitpunkten für die jeweiligen Wissenstests gebildet. Es werden die Abkürzungen VT_3 , NT_3 und LT_3 , sowie $Behalten_NT_i$, $Transfer_NT_i$, $Gesamt_NT_i$, $Behalten_LT_i$, $Transfer_LT_i$, $Gesamt_LT_i$ verwendet, wobei $i=1, 2$ für die jeweilige Testversion, V für Vortest, N für Nachtest und L für Langzeittest steht (Kapitel 9).

Die statistische Auswertung erfolgt mit Hilfe des Computerprogramms SPSS. Es wird ein Protokoll über nicht beantwortete Aufgaben (fehlende Werte im SPSS) und Doppelantworten geführt. Als Ausgangsbasis werden aus zeitökonomischen Gründen die Schülerantworten nur von einer Klasse (30 Probanden) gesammelt. Diese Gruppe wird kategorisiert und die Antworten von anderen Klassen werden in diesen Kategorien eingeteilt. Wenn das erste Kategoriensystem nicht das ganze Spektrum von Antworten abdeckt, werden neue Kategorien gebildet. Das anhand von Vortest-Daten entstandene, Kategoriensystem wird auch nach dem Nach- bzw. Langzeittest mit neuen Schülerantworten erweitert.

8.7.2 Angewendetes statistisches Verfahren

Datenreinigung

In die statistische Auswertung der Hauptuntersuchung werden nur Probanden einbezogen, die einen vollen Datensatz geliefert haben, also solche die an allen Teilen der Untersuchung teilgenommen und alle Tests mitgeschrieben haben. Auf Grund der unterrichtsnahen Bedingungen der Studie ließen sich Krankheitsausfälle und die Motivation der Schüler nicht kontrollieren, deshalb gingen diese Bedingungen als Störvariablen in die Erhebung ein. Wiederholte Krankheitsausfälle, die ein Nachtesten einzelner Probanden verhinderten, führten zu einer gewissen Verkleinerung des Datensatzes.

Anhand der Beobachtung des Schülerverhaltens im Langzeittest konnte man auf eine gesunde Motivation einiger Schüler schließen. Ein weiteres Zeichen dafür war, dass diese Schüler im Vergleich zum Nachtest die Testhefte nicht oder kaum ausgefüllt hatten, wodurch sie eine minimale Punktzahl von 0 bzw. 1 erreichten. Teilweise sind die Testhefte mit Malereien oder Anmerkungen versehen, die auf ein distanziertes Verhältnis des Probanden zur Aufgabe schließen lassen. Mit diesen Probanden sind Interviews nicht mehr zu führen, weil ihre Identität nicht feststellbar ist (Anonymisierung). Es blieb daher nur die Möglichkeit die Daten dieser Probanden aus der Stichprobe herauszunehmen.

Die Stichprobe der Auswertung

Aus der Datenreinigung ergibt sich eine reduzierte Stichprobe von $N=102$ Probanden und auch eine veränderte Besetzung der Treatmentgruppen. Einen Überblick gibt die Tabelle 8-5. Die Fallzahlen der Zellen sowie die Anzahl von Mädchen und Jungen sind numerisch unterschiedlich.

N $\Sigma=102$		Lerneraktivität	
		Notizen (N)	keine Notizen (kN)
Visuelle Gestaltung des Lernprogramms	Bild (B)	Gruppe (B + N) n = 24 n(♀)=14, n(♂)=10	Gruppe (B + kN) n = 28 n(♀)=13, n(♂)=15
	Animation (A)	Gruppe (A + N) n = 24 n(♀)=12, n(♂)=12	Gruppe (A + kN) n = 26 n(♀)=16, n(♂)=10

Tabelle 8-5: Besetzung der Treatmentgruppen bei der Stichprobengröße von 102 Probanden, sowie Anzahl von Mädchen und Jungen in der jeweiligen Gruppe.

Die Treatmentgruppen müssen erneut auf Homogenität (Abschnitt 8.6.1) hin geprüft werden. Es werden statistische Verfahren herangezogen, die dem Mittelwertvergleich von mehreren Gruppen bezüglich einer Variablen dienen: Durch einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) werden das Vorwissen, räumliche Vorstellungsvermögen und sprachliche Fähigkeiten untersucht, mit dem nichtparametrischen Kruskal-Wallis-Test werden das Vorwissen zur Lochkamera und Geschlecht untersucht. Das nichtsignifikante Ergebnis für alle Kontrollvariablen (Tabelle 8-6) bestätigt die Homogenität der Versuchsgruppen: Die Vergleichbarkeit der Untersuchungsgruppen ist damit gewährleistet. Die Zellenbesetzung bleibt ausreichend hoch (vgl. Abschnitt 8.2).

N $\Sigma=102$	Vorwissen zur Lochkamera	Spezieller Wissenstest T ₃	Räumliches Vorstellungs- vermögen	Sprachliche Fähigkeiten	Anzahl von Mädchen und Jungen
Signifikanzen	0,826	0,767	0,814	0,992	0,617

Tabelle 8-6: Signifikanzen der Gruppenhomogenität von fünf entscheidenden Kontrollvariablen bei der reduzierten Stichprobe.

Erstellung der Wissenstests-Skalen

Im nächsten Schritt der Auswertung wird geprüft, ob die Wissenstests (T₁, T₂, T₃) den Ansprüchen einer objektiven, reliablen und validen Skala gehorchen. Es müssen Itemgruppen gefunden werden, die zu den Skalen und damit zum Summenscore beitragen können. Für diesen Zweck werden die Lösungswahrscheinlichkeiten der gesamten Stichprobe für die einzelnen Items der Wissenstests ermittelt. Dabei werden die Daten sowohl des Nachttests als auch des Langzeittests einbezogen. Items, die in über 80% bzw. unter 20% der Fälle richtig gelöst sind, entsprechen einer zu niedrigen bzw. hohen Schwierigkeit. Diese Extrema sind wenig aussagekräftig und lassen keine Personenunterschiede erkennen (Decken- und Bodeneffekte), weshalb sie in die weitere Analyse nicht einbezogen werden. Um möglichst stark differenzieren zu können, werden Items mit Lösungswahrscheinlichkeiten zwischen 20% und 80% weiterverwendet, die zwischen diesen Grenzen breit gestreut sind (Bortz & Döring, 2003, S.218).

Die *Reliabilität*, d.h. die Zuverlässigkeit der erhobenen Daten hängt stark mit dem Messinstrument zusammen. Das Messinstrument muss bei wiederholter Messung unter gleichen Bedingungen das gleiche Ergebnis produzieren. Zur Überprüfung der Reliabilität der verbliebenen Itemgruppen wird die gebräuchlichste Methode herangezogen, die in der Bestimmung des *Cronbach's α -Koeffizienten* besteht. Mit dem α -Koeffizienten wird auch das Maß an interner Konsistenz der Itemgruppe angegeben, dass also diese Items tatsächlich das gleiche Merkmal messen. Ein Wert von $\alpha=1$ bedeutet eine perfekte Konsistenz. Je kleiner der Wert ist, desto geringer ist die interne Konsistenz des Messinstruments. Als angemessener Prüfwert wird in der Literatur ein α -Wert von 0,80 angegeben (Bortz & Döring, 2006, S.199). Werte unter 0,80 sind demnach nur für explorative Zwecke ausreichend. Im Unterschied dazu wird in der didaktischen und psychologischen Forschung (z.B. Heller & Perleth, 2000) auch mit niedrigeren Werten gearbeitet, sodass hier als Richtwert $\alpha=0,60$ angesetzt wird.

Da es sich bei dem Wissenserwerb um ein instabiles und zeitabhängiges Merkmal handelt, wird α zu jedem Messzeitpunkt bestimmt (Vor-, Nach- und Langzeittest). Diese Analysen führen zur Verkleinerung des Umfangs an Items, da solche fortgelassen werden, die die interne Konsistenz stören (Rost, 1996, S.363). Es wird dabei beachtet, dass die Inhalte des Lernprogramms abgedeckt bleiben.

Die Ergebnisse für die Reliabilitätsanalyse der endgültigen Wissenstests-Skalen sind in der Tabelle 8-7 dargestellt. Während die α -Werte für den „speziellen Wissenstest“ T₃ und für die Gesamtskalen T₁, T₂ auf einem zufriedenstellenden Niveau liegen, sind die Werte für die Ska-

len Behalten_T₁, Transfer_T₁ und Behalten_T₂ so niedrig, dass diese Itemgruppen rein explorativ ausgewertet werden müssen. Die maximale Punktzahl in jeder Skala entspricht der Itemanzahl (Tabelle 8-7) und bildet einen Referenzwert für die Verteilung von Summenscores der Probanden.

Wissenstests-Skalen	Cronbach`s α im Nachttest	Cronbach`s α im Langzeittest	Anzahl der Items	Items der Skala (Anhang D.4-D.6)
Behalten_T ₁	,446	,389	5	1b, 2, 3, 5, 8
Transfer_T ₁	,530	,478	7	6, 9, 10, 11, 13, 14, 15
Gesamt_T ₁	,651	,630	12	
Behalten_T ₂	,535	,449	6	1a_o, 1b_o, 2, 4, 7_o, 8_mc
Transfer_T ₂	,577	,562	6	5, 6, 10, 11, 12, 14
Gesamt_T ₂	,685	,662	12	
T ₃ $\alpha=0,690$ für VT ₃	,757	,796	10	1, 2a_z, 2a_o, 2b_z, 2b_o, 3_mc, 3_o, 4_o, 5_z, 6_mc

Tabelle 8-7: Reliabilitätsanalyse der Skalen zum Wissenstests (T₁, T₂, T₃) zu allen Messzeitpunkten, sowie die Items der einzelnen Skalen (o-offenes Antwortformat, z-Zeichnung, mc-Multiple-Choice).

Vergleich der Mittelwerte

Innerhalb der Treatmentgruppen wird für jede Variable zuerst eine deskriptive Statistik berechnet (Mittelwert, Standardabweichung, Minimum, Maximum). Die Mittelwerte der Summenscores werden in Prozent umgerechnet, damit die Lernleistungen auf einem Blick vergleichbar werden (Anhang E.3). Im nächsten Schritt wird geprüft, ob die Unterschiede zwischen den Treatmentgruppen statistisch relevant sind.

Als Signifikanzniveau für die statistische Auswertung wird $p=0,05$ gewählt, womit die tolerierbare Irrtumswahrscheinlichkeit auf 5% festgelegt wird. Wenn also $p<0,05$ ist, wird von einem signifikanten Ergebnis gesprochen, das im Folgenden mit * markiert wird. Liegen die Ergebnisse sogar unter $p=0,01$, so wird das Ergebnis als hoch signifikant eingestuft. Dieses Signifikanzniveau wird im Folgenden mit ** markiert. Da die Items der Wissenstests konservativ kodiert sind (Abschnitt 8.7.1), werden marginal signifikante Unterschiede ($p \in \langle 0,05; 1 \rangle$) als Tendenz mit (t) markiert und in die Interpretation einbezogen. Der Forschungsstand zur Wirkung von Animationen auf dem Wissenserwerb ist durch eine teilweise widersprüchliche Befundlage repräsentiert (Abschnitt 3.2), sodass eine Tendenz als nützliches Indiz gewertet werden kann.

Mit dem Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest (im Weiteren K-S-Test, Bühl, 2008, S.337f) wird geprüft, ob die Summenscores für die einzelnen Wissenstests-Skalen in der gesamten Stichprobe normalverteilt sind. $p<0,05$ bedeutet dabei eine signifikante Abweichung von der

Normalverteilung. In diesem Fall dürfen die Mittelwert-Vergleiche nur mit einem nichtparametrischen Test durchgeführt werden. Wenn der K-S-Test eine Normalverteilung der Summenscores für den Wissenstest-Skala ergibt ($p > 0,05$), kann mit einem parametrischen Testverfahren gerechnet werden.

Beim Vergleich von zwei Treatmentgruppen (B vs. A, N vs. kN) werden der t-Test als parametrisches und der U-Test nach Mann und Whitney als nichtparametrisches Testverfahren eingesetzt (Bühl, 2008, S.304f, 318f). Zur Überprüfung der Mittelwertunterschiede in allen vier Treatmentgruppen wird bei der Normalverteilung des Datensatzes eine einfache Varianzanalyse (einfaktorielle ANOVA) berechnet. Im Fall einer Nicht-Normalverteilung des Datensatzes wird der Kruskal-Wallis-Test herangezogen (Bühl, 2008, S.308, 330).

Das varianzanalytische Verfahren kann im Allgemeinen nur bei der Erfüllung der folgenden Voraussetzungen angewendet werden (Bortz, 2005, S.284):

- Normalverteilung der abhängigen Variablen (hier Wissenstests-Skalen) in der Grundgesamtheit.
- Normalverteilung der Fehlerkomponenten. Die Residuen sind ein Maß dafür, wie stark die Messwerte vom Stichprobenmittel in der Grundgesamtheit abweichen. In der vorliegenden Analyse werden nicht-standardisierte Residuen berechnet (Bühl, 2008, S.251f) und mit dem K-S-Test auf die Verteilungsform hin überprüft.
- Homogenität der Fehlervarianzen. Dies wird mit dem Levene-Test nachgeprüft: Ein Signifikanzniveau von $p > 0,05$ ergibt eine Gleichheit der Varianzen (Brosius, 2004, S.502).

Die *univariate Varianzanalyse* wird nach dem allgemeinen linearen Modell berechnet. Damit soll die gesamte Varianz der abhängigen Variable (Summenscores aus den Wissenstests) durch Varianzen zwischen den Treatmentgruppen und innerhalb der Gruppen aufgeklärt werden. Die sogenannten „Zwischensubjekteffekte“ sollen damit Auskunft über Haupteffekte geben, die auf die Gruppierungsfaktoren (visuelle Gestaltung und Lerneraktivität) zurückgeführt werden können (Bühl, 2008, S.442-446). Ein Vorteil der univariaten Varianzanalyse ist, dass sie auch die Effektstärke (partielle Eta-Quadrat η^2) der Haupteffekte berechnet. Die Effektstärke gibt Auskunft über den Anteil der aufgeklärten Varianz durch die betreffende unabhängige Variable. Sie wird im Abschnitt 9.4 detailliert beschrieben.

In der Auswertung findet weiterhin die *multivariate Varianzanalyse* (MANOVA) Verwendung. Damit wird der Einfluss von Gruppierungsfaktoren auf mehrere abhängigen Variablen (Skalen des Wissenstests) in derselben Varianzanalyse gleichzeitig untersucht (Bühl, 2008, S.457).

Kovarianzanalyse

Wie im Abschnitt 8.3 beschrieben, werden in der Hauptuntersuchung mehrere Kontrollvariablen erhoben, um ihre Einflüsse auf die abhängige Variable „Wissenserwerb“ zu klären und in einem weiteren Schritt zu neutralisieren (Bortz & Döring, 2003, S.544f). Ein statistisches Verfahren, das dies ermöglicht, ist die Varianzanalyse mit Kovariate. Die erhobenen Kontrollva-

riablen werden erst zur Kovariate, wenn sie die folgenden Voraussetzungen erfüllen (Bortz, 2005, S.369f):

- Voraussetzungen der Varianzanalyse,
- Kardinalskalierung der Kontrollvariablen,
- Reliabilität der Kontrollvariablen,
- signifikante Korrelation zwischen der abhängigen Variable und Kontrollvariable,
- die Untersuchungsgruppen unterscheiden sich signifikant in der Kontrollvariable.

Am einfachsten lässt sich mit der letzten Voraussetzung nachweisen, dass eine Kontrollvariable keine Kovariate ist. Außerdem ist das das einzige Kriterium, welches man untersuchen kann, wenn man nominalskalierte Lernermerkmale (z.B. Geschlecht) hat. In anderen Fällen wird die Signifikanz der Korrelation überprüft. Mit den Einflussfaktoren, die sich als Kovariate erweisen, wird nun die Kovarianzanalyse durchgeführt. In den Abschnitten 9.4 bis 9.7 wird ihre Wirkung auf die Untersuchungsergebnisse beschrieben.

Zusammenfassung

Die Forschungsfragen und Hypothesen werden in einem 2*2-Design (Visualisierungsart vs. Lerneraktivität) untersucht. Als abhängige Variable wird der Wissenserwerb zu vier Testzeitpunkten (Pre – Post 1 – Post 2 – Follow-up) gemessen. Es werden weiterhin die Lernermerkmale aufgenommen und anhand ihrer homogene Treatmentgruppen gebildet. Alle für die Untersuchung potentiell relevanten Variablen sind in diesen Gruppen im Durchschnitt gleich ausgeprägt. In Folge dessen gehen mögliche Gruppenunterschiede in Bezug auf die abhängige Variable (Wissenserwerb) mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die unabhängigen Variablen (B vs. A, N vs. kN) zurück. Die Vergleichsuntersuchung verläuft unter schulischen Bedingungen, die Rahmenbedingungen der lernpsychologischen Messung werden jedoch weitgehend konstant gehalten: Die Untersuchung verfügt also über eine hohe interne Validität, obwohl sie quasiexperimentell im Bereich der Schule angelegt ist. Dies ermöglicht es, Kausalaussagen mit praktischer Relevanz zu treffen.

9 Ergebnisse

„Nichts ist aufschlussreicher als ein Land mit sich selbst zu vergleichen,
in dem man die Unterschiede erfasst und versucht,
den Faden der Kontinuität aufzunehmen.“
(Cartier-Bresson)

9.1 Ergebnisse des Vortests

Allgemeine Fragen

Der Vortest der Hauptuntersuchung enthält unter anderem allgemeine Fragen (Abschnitt 8.3.1, Anhang D.3). Zunächst soll die Stichprobe anhand dieser Daten vorgestellt werden (Tabelle 9-1), danach werden die statistischen Kennwerte der Kontrollvariablen (Abschnitt 8.3.2 bis 8.3.4) beschrieben. Damit dienen die Ergebnisse des Vortests zur genauen Charakterisierung der Merkmale der Stichprobe (N=102).

- Das Alter der Probanden liegt zwischen 13 und 14 Jahren (M=13,50; M-Mittelwert; 8.Klasse). In der Stichprobe sind 55 Schülerinnen und 47 Schüler. Die Probanden stammen aus fünf verschiedenen gymnasialen Klassen aus dem Land Brandenburg (Kleinmachnow 38%, Potsdam 24% und Werder 38% der Stichprobe). Hinsichtlich des Stadt-Land-Kriteriums können die Treatmentgruppen als homogen angesehen werden.
- Der *Notendurchschnitt* liegt in Physik bei 2,7 und in Deutsch bei 2,2. Die meisten Schüler haben also die Physiknote 2 oder 3 (38% bzw. 41%). Eine höhere Lernleistung in Physik mit den Physiknoten 1 und 2 haben 41% der Schüler. Eine niedrigere Lernleistung mit den Physiknoten 3 und 4 haben 57% der Schüler. Bei der Deutschnote überwiegen Schüler, die eher eine höhere schulische Lernleistung erzielen (Deutschnote 1 und 2: 68%, Deutschnote 3 und 4: 30%).
- Als Indiz für das *Interesse an Physik* werden die Fernsehgewohnheiten zu Sendungen mit physikalischen Themen gedeutet. Die Schüler der Teilgruppen „oft“ und „gelegentlich“ werden als „an Physik interessiert“ bezeichnet. Im Vergleich zu Starauscheks Ergebnissen (2001, S.111; s. auch Tabelle 9-2) ist in dieser brandenburger Stichprobe ein überraschend hoher Anteil (76%) von Schülern in diesem Sinne an Physik interessiert. Es gilt weiterhin, dass die Mädchen und Jungen statistisch gesehen in gleichen Anteilen an der Physik interessiert sind. Dies widerspricht nicht nur den Ergebnissen von Starauschek, sondern auch den allgemeinen Befunden (Abschnitt 8.3.1).
- In der Kategorie *Beliebtheit der Schulfächer* werden die Dreifachantworten zusammengefasst und für jedes Schulfach der prozentuale Anteil von Schülern addiert. Den Gesamtüberblick der Fächernennungen in der Stichprobe aufgeteilt nach Mädchen und Jungen enthält Anhang E.1.

Zu den drei liebsten Schulfächer in der Gesamtstichprobe gehört Sport (49%), Mathematik (37%) und Französisch (31%). Physik wird von 10% der gesamten Stichprobe als liebstes Fach genannt (Tabelle E.1-1, vier Schülerinnen und sechs Schüler).

Bei der Kategorie „Unbeliebtestes Schulfach“ (Tabelle E.1-2) rückt Physik somit deutlich nach vorne (51%), danach folgen Französisch und Musik (beide mit 31%). Damit ist Physik das unbeliebteste Schulfach dieser Stichprobe. Tabelle 9-3 zeigt einen Vergleich mit anderen unabhängigen Untersuchungen (Starauschek, 2001, S.113f; Muckenfuß, 1995, S.75ff): Die allgemein bekannte negative emotionale Einstellung zum Fach Physik konnte in der Untersuchung erneut nachgewiesen werden.

Das typische Beliebtheitsmuster für die Naturwissenschaften wird auch in dieser Untersuchung bestätigt: Biologie ist die beliebteste Naturwissenschaft, gefolgt von Chemie und der am wenigsten beliebten Physik. Deutsch zeigt eine gleich große Beliebtheit wie Unbeliebtheit (Tabelle 9-1). Im Allgemeinen liegen Sprachen bei den Mädchen in der oberen Hälfte der Beliebtheit und bei Jungen in der Unteren. Die gleiche Symmetrie gilt für die Unbeliebtheit.

N = 102	Häufigkeit	Anteil in %	M	SD
Alter	13 51	50,0	13,5 0	0,59
	14 47	46,0		
	0, 12, 15, 16 jeweils 1	4,0		
Geschlecht	M (♀) 55	53,9	-	-
	J (♂) 47	46,1		
Physiknote	0 2	2,0	2,66	0,85
	1 3	2,9		
	2 39	38,2		
	3 42	41,2		
	4 16	15,7		
Deutschnote	0 2	2,0	2,22	0,74
	1 9	8,8		
	2 60	58,8		
	3 27	26,5		
	4 4	3,9		
TV-Sendung zur Physik	oft 6	5,9	1,81	0,52
	gelegentlich 71	69,6		
	nie 25	24,5		
Liebstes Schulfach	Physik 10	9,8	-	-
	Mathematik 38	37,3		
	Deutsch 20	19,6		
Ungeliebtstes Schulfach	Physik 52	51,0	-	-
	Mathematik 30	29,4		
	Deutsch 16	15,7		

Tabelle 9-1: Zusammenfassung der Ergebnisse zu den allgemeinen Fragen für die Stichprobe der Auswertung (M-Mittelwert, SD-Standardabweichung, „0“ beim Alter - keine Angabe).

	Anzahl der Schüler der Befragung			Anteil der interessierten Schüler in %		
	N	N _{KPK}	N _{TRD}	Berger (2005/06)	Starauschek, KPK (1998)	Starauschek, TRD (1998)
Gesamt	102	113	113	75,5	44,5	40,2
Mädchen	55	60	60	78,2	34,2	28,4
Jungen	47	53	53	72,3	56,2	53,8

Tabelle 9-2: Anteile der an Fernsehsendungen über Physik interessierten Schüler in der 8. Klasse, Gymnasium (KPK-Unterricht nach Karlsruher Physikkurs, TRD-Traditioneller Unterricht in Baden-Württemberg).

	Berger (2005/06) Brandenburg	Starauschek, KPK (1998) Baden-Württemberg	Muckenfuß (1995) Baden-Württemberg
1	Physik	Physik	Physik
2	Französisch	Mathematik	Chemie
3	Musik	Französisch	Mathematik

Tabelle 9-3: Die drei unbeliebtesten Schulfächer in der Reihenfolge der Unbeliebtheit.

Selbstkonzept im Fach Physik

(P-Skala, M=13,8 , SD=2,48 , Md=14 , Min=10 , Max=18)

Der Selbstkonzeptskala nach Helmke (1992b) kann die Werte zwischen 6 und 24 Punkten annehmen. Die Werte in der Stichprobe bewegen sich zwischen 10 und 18 Punkten. Der Mittelwert der Punktzahlen täuscht, da die Schüler allein durch das Ausfüllen des Tests bereits 6 Punkte erreichen konnten. Deswegen ist für eine objektive Betrachtung eine Transformation der Werte notwendig: als Nullniveau werden 6 Punkte gesetzt, der Wertintervall bewegt sich dann zwischen 0 und 18 Punkten. Erst danach erfolgt ein Ausdruck der Punktzahlen in prozentualen Anteilen. In dieser Betrachtung liegt das durchschnittliche Selbstkonzept in der Stichprobe bei 44%. Die positive Selbsteinschätzung von Schüler bewegt sich zwischen 22% und 67% (4 und 12 Punkten). Die Stichprobe ist also insgesamt im zweiten und dritten Viertel einzustufen. Es zeigen sich keine Extreme.

Selbstwirksamkeitserwartung für das Fach Physik

(S-Skala, M=18,1 , SD=3,23 , Md=18 , Min=12 , Max=26)

Die Selbstwirksamkeitserwartung (S-Wert) für das Fach Physik nach Jerusalem & Satow (1999) kann die Werte zwischen 7 und 28 Punkte annehmen. Wenn man das Nullniveau auf 7 Punkte setzt, erhalten wir ein Intervall von {0, 21}. Dieser Transformation der Werte entsprechend weist die Stichprobe ein Wertintervall von ({12, 26} → {5, 19}) auf, das bedeutet einen Bereich von { 24%, 91%} Selbstwirksamkeitserwartung. Hier handelt es sich also um ein grö-

Beres Spektrum persönlicher Einstellungen der einzelnen Schüler zum Fach Physik als beim Selbstkonzept. Es sind Schüler in der Stichprobe, die eine eher niedrige und eine eher hohe Selbstwirksamkeitserwartung aufweisen. Der durchschnittliche S-Wert für die Stichprobe liegt mit $M=18,10 \rightarrow 11,10$ Punkten bei 53%. Die Stichprobe verfügt im Durchschnitt über eine mittlere Selbstwirksamkeitserwartung.

Sprachliche Fähigkeiten (SF)

(Max 25 Punkte, $M=15,3$, $SD=3,69$, $Md=16$, $Min=5$, $Max=23$)

In den sprachlichen Fähigkeiten erreichten die Schüler im Durchschnitt 61% der maximalen Punktzahl. Dieser prozentuale Rohwert entspricht einem KFT-Jahgangsnormwert von $T_J=48$ und einem Gymnasialnormwert von $T_G=36$ (Heller & Perleth, 2000, S.183f). Der Vergleich mit dem Mittelwert und Streuung desselben Jahrgangs und Schultyps (8. Klasse, Gymnasium, V1, Testform A: $M=18,68$, $SD=3,01$ aus Heller & Perleth, 2000, S.74) zeigt, dass die verbalen Fähigkeiten eher an der unteren Grenze des Durchschnittsbereichs liegen.

Räumliches Vorstellungsvermögen (RV)

(Max 25 Punkte, $M=17,2$, $SD=3,12$, $Md=18$, $Min=8$, $Max=21$)

Die Schüler erreichten im Durchschnitt 69% der maximalen Punktzahl. Dieser Rohwert entspricht anhand der Normentabellen (Heller & Perleth, 2000, S.183f) einem KFT-Jahgangsnormwert von $T_J=42$ und einem Gymnasialnormwert von $T_G=36$. Die Stichprobe erzielt im Vergleich zu den Schülern desselben Jahrgangs und Schultyps (8. Klasse, Gymnasium, N1, Testform A: $M=21,71$, $SD=3,51$ aus Heller & Perleth, 2000, S.74) eine niedrigere nonverbale Leistung.

Spezielles Vorwissen

(Max 10 Punkte, $M=4,3$, $SD=2,52$, $Md=4$, $Min=0$, $Max=10$)

Die Probanden erreichten im speziellen Wissenstest durchschnittlich 36% der maximalen Punktzahl. Da dieser Test auch im Nach- und Langzeittest eingesetzt wird, ist noch genug Raum geblieben, so dass man später zwischen den Treatmentgruppen statistische Unterschiede in der Lernleistung messen kann (Sumfleth et al., 2002, S.122).

Mädchen und Jungen im Spiegel des Vortests

In der Stichprobe sind 55 Schülerinnen und 47 Schüler. Wenn man diese Teilstichproben vergleicht, kann man teilweise eine unterschiedliche Gewichtung erkennen. Tabelle 9-4 beinhaltet die Ergebnisse des Vortests zu den Kontrollvariablen:

Kontrollvariablen	Mädchen (N _♀ =55)		Jungen (N _♂ =47)	
	M _♀	SD _♀	M _♂	SD _♂
Physiknote	2,6	0,89	2,7	0,81
Deutschnote	2,1*	0,66	2,4*	0,80
Beliebtstes Fach (%)				
Ph	7,3		12,8	
Ma	30,9		44,7	
De	23,6		14,9	
Unbeliebtstes Fach (%)				
Ph	63,6		36,2	
Ma	30,9		27,7	
De	10,9		21,3	
TV-Sendungen zur Physik (%)				
oft	1,8		10,6	
gelegentlich	76,4		61,7	
nie	21,8		27,7	
P-Skala	14,0	2,70	13,6	2,19
S-Skala	17,6	3,30	18,7	3,09
RV	17,2	3,36	17,2	2,84
SF	14,8	3,70	15,8	3,65
VT ₃ (Punktzahl)	3,6*	2,46	5,0*	2,41
(%)	31,1*		41,5*	

Tabelle 9-4: Vergleich der Kontrollvariablen von Mädchen und Jungen anhand den Ergebnissen des Vortests.

Der Vergleich der durchschnittlichen *Schulleistung* anhand der Zeugnisnoten ergibt, dass Jungen numerisch bessere Lernleistung in Physik und signifikant bessere Leistung im Deutsch erzielen ($p = ,037^*$, $\eta^2 = ,044$ mit Varianzanalyse ermittelt). Anhand der TV-Sendungen zeigt sich zwischen Mädchen und Jungen ein gleiches Interesse an physikalischen Themen.

Physik und Mathematik wird von Jungen als *liebstes Fach* öfters genannt als von Mädchen, Deutsch ist wiederum bei Mädchen beliebter. Physik ist für den größten Anteil der Mädchen das unbeliebteste Fach (64%), bei Jungen hingegen ist dieser Anteil gar nicht so drastisch (36%). Mathematik ist bei den Jungen (45%) sehr beliebt und liegt auch bei Mädchen (31%) im oberen Bereich, so dass das Fach in der Gesamtstichprobe den zweiten Platz einnimmt.

Das durchschnittliche *Selbstkonzept im Fach Physik* (P-Skala) entspricht nach der Transformation der Mittelwerte in prozentuale Anteile bei Mädchen 44% und bei Jungen 42%. Ein Unterschied kann statistisch nicht gezeigt werden. Damit widerspricht dieser Befund anderen empirischen Ergebnissen zu geschlechtsspezifischen Unterschieden (Staraschek, 2001, S.101; s. auch Abschnitt 8.3.2), denn Mädchen und Jungen dieser Stichprobe haben im Fach

Physik das gleiche, mittlere Selbstkonzept. Dies gilt auch für die *Selbstwirksamkeitserwartung* (S-Skala): der Unterschied zwischen Mädchen und Jungen (51% vs. 56%) ist nicht signifikant.

Der Geschlechtsunterschied der *sprachlichen Fähigkeiten* (SF) in der Stichprobe entspricht ihrer Jahrgangsstufe (Heller & Perleth, 2000, S.87). Der Unterschied ist aber nur numerischer Natur, die Schülerinnen und Schüler sind statistisch gesehen in ihren sprachlichen Fähigkeiten gleich. Ein Unterschied im *räumlichen Vorstellungsvermögen* (RV) kann ebenfalls nicht gezeigt werden. Dies lässt vermuten, dass die Schülerinnen und Schüler der Stichprobe in gleichem Maß mit RV-fördernden Objekten der Wirklichkeit konfrontiert waren (Abschnitt 5.2).

Im *speziellen Wissenstest* (VT₃) erzielen die Jungen ein signifikant höheres Vorwissen als die Mädchen ($p = ,017^*$; $\eta^2 = ,055$ mit Varianzanalyse ermittelt). Die Jungen verfügen zwar über ein breiter gefasstes Wissen in der Physik; dies hat aber keine Auswirkung auf ihre durchschnittliche Schulleistung.

9.2 Akzeptanz des Lernprogramms

Nach der Bearbeitung von jedem Teil des Lernprogramms werden die Schüler im Wissenstestheft zuerst aufgefordert, in Analogie zu Schülerbefragungen (Staraushek, 2001 und 2006b) zwei offene, symmetrische Fragen zur Einschätzung des Lernprogramms zu beantworten:

- Was gefällt Dir an dem Lernprogramm zur Lochkamera?
- Was gefällt Dir nicht an dem Lernprogramm zur Lochkamera?

Zu jeder Frage stehen drei Zeilen zur Verfügung, damit ein schülergerechter Rahmen für die Antwort angeboten wird. Die Antworten werden nach einem reduzierten, induktiven Verfahren kategorisiert, das sich an der qualitativen Inhaltsanalyse von Mayring (2000) orientiert: Die Aussagen werden dabei in „Sinneinheiten“ zerlegt, paraphrasiert und anhand von Ankerbeispielen sortiert (Staraushek, 2001, S.273-280). Die entstandenen Kategorien und Unterkategorien von Schüleräußerungen sind im Anhang E.2 zusammengefasst.

Zu dem ersten bzw. zweiten Teil des Lernprogramms hat sich 100% bzw. 96% der Schüler positiv geäußert. Das ergibt eine positive Einstellung von 98% der Schüler. Bei den negativen Äußerungen fällt die starke Besetzung der Kategorien „Keine Kritik“ und „Keine Angabe“ auf (Tabelle E.2-2). Sie lassen sich dahingehend zusammenfassen, dass 51% der Schüler am ersten Teil bzw. 62% der Schüler am zweiten Teil des Lernprogramms nichts auszusetzen haben. Für beide Teile des Lernprogramms bedeutet dies eine vollkommene Zufriedenheit von 56% aller Schüler.

Im Folgenden werden die positiven und negativen Aspekte zu den Merkmalen des Lernprogramms anhand der Schüleräußerungen dargestellt. Diese Aspekte sind in den Unterkategorien der aufgeführten Tabellen 9-5 bis 9-11 gefasst. Es waren Mehrfachnennungen möglich. Damit die relativen Häufigkeiten von positiven und negativen Äußerungen verglichen werden können, wird die Stichprobengröße als Bezugsgröße für die Prozentangaben festgelegt

(N=102). Bei der gleichzeitigen Betrachtung der beiden Lernprogramme ist es die doppelte Stichprobengröße (N=204). Bei den Prozentangaben handelt es sich um gerundete Werte. Auf die statistische Berechnung von Signifikanzen wird verzichtet, da sich die Zahlen eindeutig interpretieren lassen. Die Intercoder-Reliabilitäten sind mit einer prozentualen Übereinstimmung von ca. 95% befriedigend.

Verständlichkeit des Lernprogramms

Die Verständlichkeit des Lernprogramms wird für die Schüler von den Erklärungen (einfach, logisch, Schritt für Schritt), dem Umfang, dem Text-Bild-Bezug und den Bildern (Tabelle E.2-1) beeinflusst. Diese Unterkategorien werden in der allgemeinen Verständlichkeit des Lernprogramms, dem Textverstehen und dem Bildverstehen zusammengefasst (Tabelle 9-5). Dabei erhält man die folgenden Ergebnisse:

Für die positive Einschätzung der allgemeinen Verständlichkeit des Lernprogramms zeigt die Tabelle 9-5 bei dem ersten Teil des Lernprogramms mit 99% und dem zweiten Teil mit 76% wesentlich höhere Werte als für die negativen Einschätzungen (10% bzw. 5%). Die allgemeine Verständlichkeit lässt sich auf die Unterkategorien „Textverstehen“ (59% bzw. 49%) und „Bildverstehen“ (36% bzw. 22%) zurückführen. Wenn man die positiven Äußerungen für den ersten und zweiten Teil des Lernprogramms summiert, ist der Einfluss des Textes auf die gute Verständlichkeit fast doppelt so groß (58%), wie der Einfluss der Bilder (29%). Dennoch ist es eine erfreuliche Erkenntnis, dass viele Schüler die visuellen Darstellungen als verständnisfördernd erkannt haben. Die Kritik an der Verständlichkeit lässt sich auf die Unterkategorie 11 und 14 zurückführen. Der Stoff wird aber nur in 2% als unverständlich eingestuft. Ein deutlicheres Problem für die Schüler war das Ausmaß des Lernstoffes (6%).

Das Lernprogramm wird insgesamt im größten Teil der Aussagen (87%) als verständlich bewertet, nur ein Bruchteil der Aussagen ist negativ (8%). Dieses Ergebnis darf aber nicht überbewertet werden, weil sich die Schüler aufgrund von dem Wunsch nach sozialer Akzeptanz grundsätzlich eher positiv äußern.

Ziffer	Kategorien der Verständlichkeit	1. Teil des LP	2. Teil des LP	beide Teile
11-16	allgemeine Verständlichkeit	99	76	87
11,12,14	Textverstehen	59	49	58
15, 16	Bildverstehen	36	22	29
11, 14	allgemeine Unverständlichkeit	10	5	8
11	Zu viel Stoff auf einmal	8	5	6
14	Unverständlich	2	1	2

Tabelle 9-5: Positive und negative Äußerungen der Schüler zu der Verständlichkeit des Lernprogramms, relative Häufigkeit der Mehrfachnennungen, Angaben in Prozent.

Visualisierungen

Die Visualisierungen werden im Allgemeinen mit 72% bzw. 62% positiv bewertet. Im Gegensatz dazu fallen die negativen Äußerungen mit 4% in beiden Teilen des Lernprogramms gering aus (Tabelle 9-6). Es überwiegt also in Hinsicht auf die Visualisierungen eine positive Selbstauskunft der Lernenden.

Die mithilfe der Gestaltungsprinzipien gefertigte Bilder werden von Schüler in 18% bzw. 17% als „gut“ eingeschätzt. Bei manchen Antworten wird gerade der „Handzeichnungscharakter“ der Visualisierungen als positiv hervorgehoben, wie z.B. „es ist lustig mit der Hand gemalt“. Die Bilder werden von nur 3% bzw. 2% der Schüler als „zu einfach“ eingeschätzt. Die Probanden erkennen weiterhin die Rolle der Bilder für das Textverstehen: 36% bzw. 22% der Mehrfachantworten geben eine unterstützende Wirkung von Visualisierungen auf das Textverstehen an. Die Animationen werden bei den positiven Äußerungen eher in geringer Maße erwähnt (11% bzw. 8%). Da sie aber nicht kritisiert werden, kann eine eher positive Einstellung der Schüler zur Animationen angenommen werden.

Die negative Einschätzung der Bilder lässt sich mit 1% bzw. 2% auf die Unterkategorie „fehlende Animationen“ zurückzuführen. Diese Probanden haben im Laufe der Untersuchung bemerkt, dass ihre Mitschüler mit der Animationsversion des Lernprogramms arbeiten.

Ziffer	Kategorien der Visualisierungen	1. Teil des LP	2. Teil des LP	beide Teile
15,16, 21-25	alle positiven Äußerungen	72	62	67
21	gute Abbildungen	18	17	17
15, 16	Bildverstehen	36	22	29
25	Animationen	11	8	9
21, 22	alle negativen Äußerungen	4	4	4
21	zu einfache Bilder	3	2	3
22	fehlende Animationen	1	2	2

Tabelle 9-6: Positive und negative Äußerungen der Schüler zu den Visualisierungen des Lernprogramms, relative Häufigkeit der Mehrfachnennungen, Angaben in Prozent.

Gestaltung

Bei den Äußerungen fällt auf, dass sich die Schüler zur inhaltlichen Gestaltung des Lernprogramms nicht äußern. Lediglich die Fragen werden bei den negativen Äußerungen mit 3% bzw. 2% erwähnt (Tabelle E.2-2, 12). Die Organizer „Zusammenfassung, Wiederholung“ werden wiederum gelobt (Tabelle E.2-1, 3). Es hat sich weiterhin gezeigt (Tabelle 9-7), dass die Prinzipien des Multimedialernens von den Schülern positiv wahrgenommen werden (38% bzw. 24%). Dabei ist die auditive („Hören“ 16% bzw. 11%) und darauf folgende textuelle Darbietung der Information („Lesen“ 16% bzw. 8%) hervorzuheben.

Die Stimme im Lernprogramm ist ambivalent: sie wird sowohl positiv als auch negativ be-

wertet. Bei den negativen Äußerungen hebt sich die Kritik an der Stimme jedoch fast auf: Es wird von neun Schüler als „zu schnell“, von fünf Schüler wiederum als „zu langsam“ bezeichnet (Tabelle E.2-2). Kritik wird weiterhin in geringen Prozentsätzen zur Navigation und zur beschränkten Möglichkeit des Hörens geäußert.

Ziffer	Kategorien der Gestaltung	1. Teil des LP	2. Teil des LP	beide Teile
41-44	alle positiven Äußerungen	38	24	31
41	gute Struktur	2	1	2
42	„Hören“	16	11	13
43	„Stimme“	5	4	4
44	„Lesen“	16	8	12
31-35	alle negativen Äußerungen	16	12	14
31-33	„Stimme“	10	7	8
34	„Navigation“	4	3	3
35	„Hören nur einmal“	2	2	2

Tabelle 9-7: Positive und negative Äußerungen der Schüler zur Gestaltung des Lernprogramms, relative Häufigkeit der Mehrfachnennungen, Angaben in Prozent.

Zur Kategorie „Instruktion“ wurden insgesamt sehr wenige Äußerungen abgegeben (3% bis 8%, Tabelle E.2-1, E.2-2). Als positiv wird die Arbeit am Computer, das individuelle Lerntempo und im Fall eines Schülers die Anfertigung von Notizen erwähnt. Bei den negativen Äußerungen zur Instruktion werden die Notizen und gleichermaßen die fehlende Experimente und Aufgaben kritisiert. Die Einstellung der Schüler zur Anfertigung von Notizen kann insofern als neutral angenommen werden.

Eine allgemein positive Zustimmung zum Lernprogramm äußert sich in 6% bzw. 9% der Schülermehrfachantworten (Tabelle E.2-1, 61). Eine eindeutige Ablehnung und sonstige Kritik wird insgesamt in 14% der Nennungen abgegeben (Tabelle E.2-2, 5).

Klassenstufen im Vergleich

Der erste Teil des Lernprogramms wurde in Gymnasien in Brandenburg und auch in Berlin in der 7. Klasse (N=79) und 10. Klasse (N=102) eingesetzt und untersucht. Die Durchführung fand in den Jahren 2003, 2004 und 2005 unter der Leitung von Erich Staraschek statt. In den Schüleraussagen der hier vorliegenden Untersuchung (8. Klasse, N=102) haben sich die gleichen Hauptkategorien ausgebildet wie bei Staraschek (2006b, S.152f). Dies ermöglicht den direkten Vergleich der beiden Studien. Die folgende Tabelle 9-8 stellt den Vergleich von positiven Äußerungen zum ersten Teil des Lernprogramms in den unterschiedlichen Klassenstufen dar. Die Daten zu den 7. und 10. Klassen sind nach Staraschek (2006b, S.144) zitiert. Da Mehrfachnennungen möglich waren, steht N_7 , N_8 und N_{10} für die Anzahl aller positiver bzw.

negativer Äußerungen in den entsprechenden Klassenstufen. Die Prozentangaben der Mehrfachnennung beziehen sich auf die jeweilige Stichprobengröße.

Ziffer	Positive Äußerungen	7. Klasse N ₇ =116	8. Klasse N ₈ =187	10. Klasse N ₁₀ =245
1	Verständlichkeit	84	99	116
2	Bilder	9	35	32
4	Gestaltung	23	38	45
<hr/>				
11, 12, 14	Textverstehen	51	59	56
15, 16	Bildverstehen	26	36	56
21	gute Abbildungen	8	18	12

Tabelle 9-8: Vergleich von positiven Äußerungen zwischen den Klassen 7, 8 und 10.

Die Verständlichkeit des Lernprogramms wird mit zunehmend höherer Klassenstufe immer positiver eingeschätzt. Das ist leicht zu interpretieren: Die kognitiven Fähigkeiten und das allgemeine, physikalische Wissen von Schüler steigt mit den höheren Klassenstufen, wodurch die Lerninhalte für die Schüler verständlicher werden. Ebenso wird die Gestaltung des Lernprogramms mit zunehmendem Alter auch mehr geschätzt. Es zeigt sich also eine höhere Wertschätzung der Schüler gegenüber dem Lernmaterial. Ein großer Sprung ist in der Kategorie „Bilder“ zu beobachten: Die Schüler der 8. Klasse schätzen die Bilder fast um das Vierfache positiver ein als die jüngeren Schüler der 7. Klasse. Die Einschätzung in der 10. Klasse liegt auf ähnlich hohem Niveau wie in der 8. Klasse.

Die Verständlichkeit des Lerntextes wird in allen Klassenstufen ungefähr gleich positiv eingeschätzt. Die nahezu lineare Zunahme der allgemeinen Verständlichkeit ist also auf die zusätzliche Wahrnehmung der unterstützenden Funktion von Bildern für das Textverstehen zurückzuführen. Das wird in der Unterkategorie „Bildverstehen“ auch anhand der Prozentangaben sichtbar: Es ist eine annähernd lineare Verstärkung der Kategorie „Bilder unterstützen das Verstehen“ über die Klassenstufen zu beobachten. Die Bilder scheinen für die Achtklässler am ansprechendsten zu sein (Tabelle 9-8, 21).

Ein Vergleich von negativen Äußerungen zwischen den Klassenstufen 7, 8 und 10 zum ersten Teil des Lernprogramms umfasst die Tabelle 9-9. Im Allgemeinen gilt, dass die Schüler der vorliegenden Untersuchung insgesamt wenig Kritik ausgeübt haben. Anhand der Daten scheinen die Schüler der 7. Klasse mit der Verständlichkeit des Lernprogramms am meisten Probleme zu haben. Dies ist auf die Unverständlichkeit der Texte und auf die Länge des Programms zurückzuführen. In den Klassen 8 und 10 ist der Menge des Lernstoffs nur für 8 bis 9% der Schüler problematisch. In der 10. Klasse werden die Schüler auch kritischer für die Bilder. Der Großteil der Zehntklässler (56%, Tabelle 9-8) erkennt dennoch ihre unterstützende Funktion für das Verstehen. Die Kritik an den Bildern in der 7. und 8. Klassen ist zu vernachlässigen. Die negative Bewertung der Gestaltung wächst auch mit der Klassenstufe. Ungefähr

die Hälfte der Antworten aller Klassenstufen entfallen auf die Unterkategorie „Stimme“ innerhalb der Hauptkategorie „Gestaltung“.

Ziffer	Negative Äußerungen	7. Klasse N ₇ =87	8. Klasse N ₈ =55	10. Klasse N ₁₀ =135
1	Verstehen	32	13	15
2	Bilder	4	4	19
3	Gestaltung	11	16	22
91, 6	keine Angabe, keine Kritik	46	52	46
14	unverständlich	10	2	4
11	zu viel Stoff auf einmal	22	8	9
21	zu einfache Bilder	0	3	7
31-33	„Stimme“	5	10	13

Tabelle 9-9: Vergleich von negativen Äußerungen zwischen den Klassen 7, 8 und 10.

Treatmentgruppen im Vergleich

In dieser Analyse werden nur die Treatmentgruppen „Bild“ vs. „Animation“ betrachtet (52 bzw. 50 Probanden), weil die Verständlichkeit der Visualisierungen in Hinsicht auf die Zielsetzung der Untersuchung im Mittelpunkt steht. Der Vergleich für positive und negative Äußerungen ist in den Tabellen 9-10 und 9-11 dargestellt. Die Prozentangaben der Mehrfachnennung beziehen sich auf die Größe der Treatmentgruppe. N_B und N_A steht für die Anzahl aller positiven bzw. negativen Äußerungen in den entsprechenden Treatmentgruppen. In der Diskussion werden nur bedeutsame Unterschiede von mindestens 10% dargestellt.

Ziffer	Positive Äußerungen	1. Teil des LP		2. Teil des LP	
		Bild N _B =93	Anim N _A =94	Bild N _B =85	Anim N _A =80
1	Verständlichkeit	102	96	75	76
2	Bilder	25	46	39	42
4	Gestaltung	42	34	25	22
11, 12, 14	Textverstehen	52	66	46	52
15, 16	Bildverstehen	44	28	23	20
21	gute Abbildungen	15	20	15	18
25	tolle Animationen	0	22	0	16

Tabelle 9-10: Vergleich von positiven Äußerungen zwischen den Treatmentgruppen „Bild“ vs. „Animation“ für beide Teile des Lernprogramms.

Ziffer	Negative Äußerungen	1. Teil des LP		2. Teil des LP	
		Bild N _B =36	Anim N _A =32	Bild N _B =29	Anim N _A =28
1	Verständlichkeit	15	10	8	8
2	Bilder	4	4	6	4
3	Gestaltung	19	12	15	8
91, 6	keine Angabe, keine Kritik	46	56	58	66
14	unverständlich	4	0	0	2
11	zu viel Stoff auf einmal	8	8	4	6
21	zu einfache Bilder	2	4	2	2
31-33	„Stimme“	14	6	10	8

Tabelle 9-11: Vergleich von negativen Äußerungen zwischen den Treatmentgruppen „Bild“ vs. „Animation“ für beide Teile des Lernprogramms.

Die Schüler äußern insgesamt wenig Kritik zu dem Lernprogramm. Bei dieser positiven Einstellung überwiegen wieder die Schüler der Animationsgruppe (46% vs. 56%, Tabelle 9-11). Die Schülerantworten der zwei Treatmentgruppen zeigen einen eindeutigen Unterschied in der Kategorie „Bilder“ (25% vs. 46%, Tabelle 9-10), aus dem man auf eine generelle Präferenz für Visualisierungen in der Animationsversion des Lernprogramms schließen kann. Diese Präferenz lässt sich auf die Begeisterung über die Animationen zurückzuführen, die von 22% bzw. 16% der Schüler explizit erwähnt worden ist. Dieser Effekt kann als Neuheitseffekt erklärt werden. Im zweiten Teil bewertet wiederum die Bildergruppe die Visualisierungen positiver, was den Unterschied wieder verschwinden lässt (39% vs. 42%).

In der Einschätzung des Textverstehens unterscheiden sich die Gruppen erneut im ersten Teil des Lernprogramms (52% vs. 66%, Tabelle 9-10): Die Animationsgruppe findet die Erklärungen verständlicher. In der Bildergruppe werden wiederum die Bilder als hilfreicher für das Verständnis empfunden als in der Animationsgruppe (44% vs. 28%, Tabelle 9-10).

9.3 Einfluss von Visualisierungsart und Notizen auf den Lernerfolg

Der Hauptuntersuchung liegt ein experimentelles 2*2-Design mit zwei zweifach gestuften, unabhängigen Variablen zugrunde (Abschnitt 8.2), wodurch sich nach vollständiger Kombination beider Faktoren vier Untersuchungsgruppen ergeben: B + N, B + kN, A + N, A + kN. In diesem Abschnitt wird geklärt, welchen Einfluss die beiden Gruppierungsfaktoren in ihren Ausprägungen tatsächlich haben. Wenn man die numerischen Ergebnisse der Wissenstests betrachtet (Tabelle E.3-1, a-c), schneidet die Treatmentgruppe mit Animationen und Notizen am besten ab. Sie erreicht im Mittel die höchste Punktzahl in den meisten Teilen des Wissenstests.

Im Folgenden wird untersucht, ob dieser Unterschied zu den anderen Treatmentgruppen statistisch bedeutsam ist. Es wird dabei das, im Abschnitt 8.7.2 beschriebenes analytisches Verfahren herangezogen. Da die Daten der Grundgesamtheit von den folgenden Subskalen des Wissenstests – Behalten_NT₁, Behalten_LT₁, Behalten_NT₂, Gesamt_NT₂, Behalten_LT₂ – nicht normalverteilt sind (K-S-Test), werden für diese Skalen nichtparametrische Kruskal-Wallis-Tests durchgeführt. Sie führen zu dem Ergebnis, dass die Treatmentgruppen im Lernerfolg der erwähnten Subskalen sich nicht signifikant unterscheiden.

Für die Subskalen, die im Datensatz normalverteilt sind (K-S-Test) und die eine Varianzgleichheit aufweisen (Levene-Test), wird eine einfache Varianzanalyse gerechnet (einfaktorielle ANOVA): Für jede abhängige Variable wird ein eigener Test mit den festen Faktoren „Visualisierungsart“ und „Notizen“ durchgeführt. Die Ergebnisse sind aus der Tabelle 9-12 zu entnehmen:

Subskalen der Wissenstests	F _(1,101)	Signifikanz
Transfer_NT ₁	,242	n.s.
Gesamt_NT ₁	,770	n.s.
Transfer_LT ₁	,733	n.s.
Gesamt_LT ₁	1,502	n.s.
Transfer_NT ₂	1,018	n.s.
Transfer_LT ₂	,194	n.s.
Gesamt_LT ₂	,180	n.s.
VT ₃	,547	n.s.
NT ₃	3,783	p = ,055 (t) η ² = ,037
LT ₃	1,097	n.s.

Tabelle 9-12: Vergleich der Subskalen der Wissenstests in der vier Treatmentgruppen (einfaktorielle ANOVA, Test der Zwischensubjekteffekte: Visualisierungsart*Notizen).

Die Signifikanztests ergeben für die drei Wissenstests und deren Subskalen keinen signifikanten Unterschied zwischen den vier Gruppen. Eine Tendenz mit einem kleinen bis mittleren Effekt zeigt sich jedoch im post-Test des „speziellen Wissenstests“ (NT₃). Um die Wichtigkeit dieser Tendenz beurteilen zu können, wird der Einfluss des Vorwissens betrachtet. Die univariate Varianzanalyse (abhängige Variable: VT₃, feste Faktoren: „Visualisierungsart“ und „Notizen“) zeigt, dass die Gruppen sich im Vorwissen nicht unterscheiden ($F_{(1,101)} < 1,0$). Ein signifikanter Zusammenhang kann jedoch zwischen NT₃ und VT₃ festgestellt werden ($r = ,596^{**}$; $p = ,000^{***}$), deshalb kann mit Vorwissen als Kovariate gerechnet werden. Die Varianzanalyse mit der Kovariate bestätigt erneut die Tendenz für NT₃ ($F_{(1,101)} = 3,443$; $p = ,067$

(t) ; $\eta^2 = ,034$). Für die Treatmentgruppen kann man dann anhand der numerischen Daten (Tabelle E.3-1, c) die folgende Reihenfolge aufstellen:

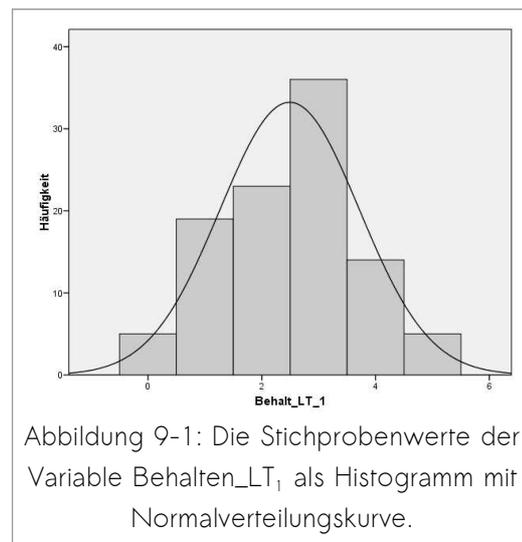
$$NT_3: \quad A + N \quad > \quad B + kN \quad > \quad B + N \quad > \quad A + kN$$

Anhand dieser Analyse kann *Hypothese 4* (Abschnitt 8.1) auf der Trend-Ebene für NT_3 angenommen werden, wobei sich auch die Intervention „Bild ohne Notizen“ ($B + kN$) als ähnlich förderlich herausgestellt hat. Für die anderen Subskalen ist *Hypothese 4* als nicht bestätigt anzusehen.

9.4 Einfluss der Visualisierungsart auf den Lernerfolg

Zwar konnten zwischen den vier Untersuchungsgruppen keine statistisch bedeutsame Unterschiede gefunden werden, das 2*2-Design ermöglicht jedoch paarweise Vergleiche zwischen den Treatmentgruppen. So wird die Stichprobe unter dem Gesichtspunkt der visuellen Gestaltung (Bild vs. Animation, Abschnitt 9.4, 9.5) und in Hinblick auf die Lerneraktivität (Notizen vs. keine Notizen, Abschnitt 9.6, 9.7) untersucht.

Der Anteil der richtigen Lösungen beträgt über allen Subskalen des Wissenstests ($\sum_{i=1,2,3} NT_i + \sum_{i=1,2,3} LT_i$, Tabelle E.3-2) in der Bildergruppe 55,2%, in der Animationsgruppe 57,8%. Die Lösungswahrscheinlichkeit zum ersten Teil des Lernprogramms zeigt jedoch einen deutlicheren Lernvorteil der Gruppe „Animation“ (58,3%) gegenüber der Gruppe „Bild“ (52,8%). Dieser Lernvorteil stammt hauptsächlich aus der Subskala Behalten_LT₁. Da die Stichprobenwerte dieser Subtests keiner Normalverteilung folgen (K-S-Test), wird ein nichtparametrischer U-Test für den Vergleich der zwei unabhängigen Stichproben durchgeführt. Mit diesem



Verfahren wird ein nachhaltig positiver Effekt von Animationen in der Behaltensleistung nachgewiesen (Behalten_LT₁, $p = ,043^*$). Dieses Ergebnis wird zusätzlich mit der univariaten Varianzanalyse bestätigt ($F_{(1,101)} = 4,210$; $p = ,043^*$; $\eta^2 = ,041$). Die Voraussetzung für die Varianzhomogenität ist dabei erfüllt. Das einzige Problem für die Varianzanalyse ist, dass es sich bei diesem Datensatz um eine Verteilung (Abbildung 9-1) mit einer negativen Kurtosis (Steilheit, $y = -,472$) handelt: Sie ist also *flacher* als die Normalverteilung (Brosius, 2004, S.371f). Die Normalverteilung der Stichprobenwerte für Behalten_LT₁ wird aufgrund der folgenden Überlegungen jedoch angenommen:

- Die Schiefe der Verteilung ist negativ (linksschiefe Verteilung, $x = -,059$), d.h. die kleinen Werte auf der linken Seite der Verteilung streuen stärker als auf der rechten Seite. Die Abweichung dieser Schiefe von der Schiefe der symmetrischen Normalverteilung ($x_N = 0$) ist

einerseits gering, andererseits sind Abweichungen von der Normalität zu vernachlässigen, wenn die Populationsverteilung schief ist (Bortz, 2005, S.287).

- Da die zwei Treatmentgruppen fast gleich groß sind und über vielen Probanden verfügen, ist die gerechnete Varianzanalyse gegenüber Verletzungen relativ robust (Bortz, 2005, S.287).

Fazit: Im Fall von Behalten_{LT1} ist zwar die Normalverteilung nicht gegeben, man kann aber trotzdem parametrisch rechnen. Durch diese weitere Analyse erhalten wir Information über die Größe bzw. Bedeutsamkeit des Unterschieds im Lernerfolg. Das partielle Eta-Quadrat von $\eta^2 = ,041$ entspricht nämlich 4,1% der geklärten Varianz. Dies beschreibt den Varianzanteil der abhängigen Variable Behalten_{LT1}, der auf die unabhängige Variable „Visualisierungsart“ zurückzuführen ist (Bortz, 2005, S.280; Brosius, 2004, S.629). Anhand dessen kann die Effektgröße ex post bestimmt werden (Gleichung (2), Tabelle 9-13):

- $\eta^2 = ,041 \in \langle 0,01 ; 0,10 \rangle \Rightarrow$ kleiner bis mittlerer Effekt
- $E = 0,21 \in \langle 0,10 ; 0,25 \rangle \Rightarrow$ kleiner bis mittlerer Effekt.

Der durch die Untersuchung empirisch ermittelte „wahre“ Effekt der Animationen entspricht also einem schwachen bis mittleren Effekt. Da letztendlich der Untersuchungskontext darüber entscheidet, was als kleiner und was als großer Effekt zu bezeichnen ist (Bortz & Döring, 2003, S.503, 611), stellt sich die Frage: Wie groß ist der praktisch bedeutsame Effekt für die fachdidaktischen Forschung bzw. für das Lernen?

Es soll dabei der Einsatzaufwand und der, durch die neue Methode erzielte Lernerfolg überlegt werden. Kleine Effekte sind zwar auch lernrelevant, aber sie rechtfertigen noch nicht den Aufwand des Einsatzes. Große Effekte sind wiederum kaum zu erwarten, weil im Lernen mehrere komplexe Faktoren eine Rolle spielen. Demzufolge bedeuten mittlere Effekte schon einen Erfolg für die Verbesserung der Unterrichtspraxis und kleinere bis mittlere Effekte sind noch lohnenswert einzusetzen. In Hinblick auf diese Überlegung soll die Bedeutsamkeit der erhaltenen Effektstärken eingeschätzt werden (Kapitel 10).

Die Gruppen „Bild“ und „Animation“ unterscheiden sich zwar nicht im Vorwissen VT₃ (Abschnitt 9.3, $F_{(1,101)} < 1,0$ auch für B vs. A), das Vorwissen kann trotzdem in der Varianzanalyse als Kovariate eingesetzt werden, weil zwischen Behalten_{LT1} und VT₃ eine signifikante Korrelation besteht ($r = ,448^{**}$; $p = ,000^{***}$). Durch diese Kovarianzanalyse verstärkt sich die positive Wirkung der Animationen auf die langfristige Behaltensleistung (Behalten_{LT1}: $F_{(1,101)} = 6,016$; $p = ,016^*$; $\eta^2 = ,058$; kleiner bis mittlerer Effekt).

Hypothese 1 kann anhand dieses Ergebnisses partiell für den ersten Teil des Lernprogramms und für die langfristige Behaltensleistung bestätigt werden. Es ist keine Tendenz abzulesen, ob und wie die Transferleistung der Probanden durch die Animationen beeinflusst wird.

Bestimmung der Effektstärken (δ , E)		
t-Test für unabhängigen Stichproben, Gleichung (1)	Einfaktorielle Varianzanalyse, Gleichung (2)	Varianzaufklärung
$\delta = \frac{\text{Differenz der Mittelwerte}}{\text{Streuung des Merkmals}} = \frac{M_A - M_B}{SD}$ <p>SD - die Standardabweichung der unabhängigen Variable in der Stichprobe M_B, M_A - die Mittelwerte der Treatmentgruppen „Bild“ und „Animation“</p>	$E = \sqrt{\frac{\eta^2}{1 - \eta^2}}$	η^2 η^2 - partielles Eta-Quadrat ermittelt im SPSS unter „univariate Varianzanalyse“
Klassifikation der Effektgrößen		
klein 0,20 mittel 0,50 groß 0,80	klein 0,10 mittel 0,25 groß 0,40	klein 0,01 mittel 0,10 groß 0,25

Tabelle 9-13: Bestimmung und Klassifikation der Effektgrößen (Bortz & Döring, 2003, S.604f, 608).

Einfluss der Kontrollvariablen

Die Bild- und Animationsgruppen unterscheiden sich in den Kontrollvariablen nicht (Tabelle E.4-1), insofern kann das Ergebnis zur *Hypothese 1* unverändert bleiben.

Zur weiteren Analyse soll die **Bearbeitungszeit** als Kovariate herangezogen werden, die den zeitlichen Faktor des Lernens berücksichtigt. Die Lernenden verbringen im Durchschnitt weniger Zeit mit dem zweiten Teil des Lernprogramms. Dies liegt einerseits an der kürzeren Darbietungszeit des zweiten Teils im Vergleich zum ersten Teil des Lernprogramms. Andererseits hängt es mit dem Motivationsverlust während der Anfertigung der Notizen im zweiten Teil des Lernprogramms zusammen (Tabelle 9-26).

Die Tabelle 9-14 enthält die mittlere Verweildauer auf dem jeweiligen Seitentyp (Abschnitt 7.3) für die Gruppen „Bild“ und „Animation“. Die numerischen Werte stammen aus der Analyse von Logfiles (Abschnitt 8.3.5). Die Gruppen unterscheiden sich nicht in der gesamten Bearbeitungszeit. Damit ist *Hypothese 5* widerlegt. Dies kann an der Neuheit der Animationen liegen: Die Schüler beschäftigen sich damit gerne.

Die signifikanten Unterschiede in der Verweildauer auf der Hörseite und in der Betrachtungszeit von Animationen (U-Test, jeweils $p = ,000^{***}$) sind trivial, stammen aus der Intervention bzw. entsprechenden Programmierung des Lernprogramms. Die Kovarianzanalyse (abhängige Variable: Behalten_LT₁, fester Faktor: „Visualisationsart“, Kovariate: $t_{1_Animation}$) ergibt:

Behalten_LT₁, KoV „ $t_{1_Animation}$ “: $F_{(1,101)} = 3,663$; $p = ,059$ (t) ; $\eta^2 = ,037$.

Der signifikante Unterschied verschwindet zwischen den Treatmentgruppen „Bild“ vs. „Animation“ und der Effekt ist geschwächt. Die „Animationszeit“ war also wichtig für den Lernerfolg.

Fazit: Mit der vorliegenden Studie konnte die unterstützende Wirkung von Animationen gezeigt werden und zwar als nachhaltiger (kleiner bis mittlerer) Effekt in der Behaltensleistung.

Bild vs. Animation		t_i_Gesamt	$t_i_Hören$	$t_i_Auswählen$	$t_i_Animation$	t_i_Lesen
1. Teil (t_1)	Bild	1433,4 (~ 23,9 min)	689,8 (48 %)	425,6 (29,5 %)	-	322,5 (22,5 %)
	Anim	1564,0 (~ 26,1 min)	735,3 (47 %)	468,0 (30 %)	346,9 (24 %)	351,9 (23 %)
	p	n.s.	,000***	n.s.	,000***	n.s.
2. Teil (t_2)	Bild	849,0 (~ 14,2 min)	484,6 (57 %)	258,2 (30 %)	-	110,1 (13 %)
	Anim	965,5 (~ 16,1 min)	525,1 (54 %)	287,8 (30 %)	229,0 (24 %)	151,4 (16 %)
	p	n.s.	,000***	n.s.	,000***	n.s.

Tabelle 9-14: Mittlere Verweildauer von Bild- und Animationsgruppe auf der Seitentypen im ersten und zweiten Teil des Lernprogramms. Angabe in Sekunden und Minuten, % - prozentuale Anteil der gesamten Bearbeitungszeit t_i_Gesamt , p - Signifikanzniveau im U-Test, gerundete Werte. Die Summe von Anteilen ergibt keinen 100%, weil die Zeit auf der Auswahlseite enthält auch ein Teil der Animationszeit.

9.5 Einfluss von Lernermerkmale und Visualisierungsart auf den Lernerfolg

9.5.1 Geschlecht

In der Literatur zum Lernen mit statischen bzw. dynamischen Visualisierungen findet man keine Hinweise, ob Geschlechtsunterschiede festzustellen sind. Da die Zellenbesetzung der vorliegenden Untersuchung vergleichende Analysen erlaubt, werden auch mögliche Effekte des Geschlechts untersucht. An dieser Stelle werden nur bedeutende Ergebnisse berichtet.

Mädchen vs. Jungen (M vs. J)

Zwischen den Gruppen von Jungen (J) und Mädchen (M) zeigen sich signifikante Unterschiede im speziellen Wissenstest (T_3) und das zu jedem Zeitpunkt der Untersuchung (univariate Varianzanalyse, abhängige Variablen: VT_3 , NT_3 , LT_3 ; fester Faktor: „Geschlecht“):

Vortest (VT ₃):	$F_{(1,101)} = 5,864$; $p = ,017^*$; $\eta^2 = ,055$	(J > M , kleiner bis mittlerer Effekt),
Nachtest (NT ₃):	$F_{(1,101)} = 10,825$; $p = ,001^{***}$; $\eta^2 = ,098$	(J > M , kleiner bis mittlerer Effekt),
Langzeittest (LT ₃):	$F_{(1,101)} = 6,810$; $p = ,010^{**}$; $\eta^2 = ,064$	(J > M , kleiner bis mittlerer Effekt).

Die Jungen erzielen ein signifikant höheres Vorwissen (VT₃) als die Mädchen. Dieser Unterschied wird durch das Lernen noch größer. An dieser Stelle handelt sich um Matthäus-Prinzip: „Wer hat, dem wird gegeben.“ Wenn aber die Kovarianzanalyse mit der Kovariate VT₃ durchgeführt wird (Tabelle E.3-4), verschwindet der Effekt im Langzeittest LT₃ ($F_{(1,101)} = 1,915$; n.s.). Der signifikante Unterschied bleibt jedoch im **Nachtest NT₃** erhalten ($F_{(1,101)} = 5,071$; $p = ,027^*$; $\eta^2 = ,049$; J > M).

Fazit: Die Jungen lernen zwar mit dem Lernprogramm kurzfristig mehr als die Mädchen, dieser Geschlechtsunterschied ist aber nicht weittragend, da er in der langfristigen Lernleistung LT₃ nicht mehr nachgewiesen werden kann.

Bei der „Lochkamera-Skala“ zeigt sich im Vortest VT₃ kein Unterschied zwischen Jungen und Mädchen (U-Test ; n.s.). Zur „Lochkamera“ liegt insgesamt ein sehr geringes Vorwissen vor (Mädchen 13,3%, Jungen 7,5%). Nach der Lernphase tritt im Wissenstest zur optischen Abbildung mit der Lochkamera (T₁ und T₂) kein Unterschied zwischen den Gruppen M vs. J auf (Tabelle E.3-4). Mädchen und Jungen starten also von gleichem, geringen Wissensstand zur optischen Abbildung und lernen gleich viel durch die Lernprogramme dazu. Der Unterschied im kurzfristigen NT₃ ist deshalb als *Vorwissens-Effekt* zu werten. Jungen lernen generell nicht erfolgreicher als Mädchen.

Vergleich der Geschlechter innerhalb der Bildergruppe (J_B vs. M_B)

Wenn man die Schülerinnen und Schüler den eingesetzten Visualisierungen entsprechend teilt (B vs. A), wird deutlich, dass im Vorwissen unterschiedliche Probanden in der Bildergruppe sitzen (Tabelle E.3-5). Die univariate Varianzanalyse für die Bildergruppe (abhängige Variablen: NT₃, LT₃ ; fester Faktor: „Geschlecht“) ergibt signifikante Unterschiede zwischen Mädchen und Jungen: J_B > M_B , mittlerer bis großer Effekt. Wenn man aber die Auswirkungen der Kovariate Vorwissen durch die Varianzanalyse herauspartialisiert (im Folgenden mit „→“ symbolisiert), verschwindet der Effekt im Langzeittest und es bleibt der Unterschied zwischen Jungen und Mädchen nur im Nachtest NT₃ (J_B > M_B , mittlerer Effekt):

VT ₃ :	$(F_{(1,101)} = 2,999$; $p = ,089$ (t) ; $\eta^2 = ,057$),
NT ₃ :	$(F_{(1,101)} = 8,884$; $p = ,004^{**}$; $\eta^2 = ,151$) → $(F_{(1,101)} = 5,444$; $p = ,024^*$; $\eta^2 = ,100$),
LT ₃ :	$(F_{(1,101)} = 5,855$; $p = ,019^*$; $\eta^2 = ,105$) → $(F_{(1,101)} = 2,723$; n.s.).

Fazit: Innerhalb der Bildergruppe zeigt sich ein kurzfristiger Effekt des Geschlechts in der Behaltensleistung NT₃ (J_B > M_B , mittlerer Effekt). In Anlehnung an den vorherigen Abschnitt, kann die bessere Lernleistung von Jungen an einem *Vorwissens-Effekt* liegen.

Einen scheinbaren Widerspruch findet man, wenn man die Subskala Behalten_NT₂ anschaut: Die univariate Varianzanalyse (abhängige Variable: Behalten_NT₂, fester Faktor: „Geschlecht“) ergibt hier einen tendenziellen Unterschied zwischen den Gruppen. In der Varianzanalyse mit der Kovariate Vorwissen VT₃ wird der Unterschied signifikant und weist auf ein Lernvorteil der Mädchengruppe hin (**M_B > J_B**, mittlerer Effekt):

Behalten_NT₂: $(F_{(1,101)} = 3,986 ; p = ,051(t) ; \eta^2 = ,074) \rightarrow (F_{(1,101)} = 4,976 ; p = ,030^* ; \eta^2 = ,092).$

Dieser Effekt lässt sich mit Hilfe der Kontrollvariable „TV-Sendungen zur Physik“ erklären. Die Varianzanalyse mit dieser Kovariate zeigt (abhängige Variablen: Behalten_NT₂, NT₃; fester Faktor: „Geschlecht“; Kovariaten: VT₃, „TV-Sendungen zur Physik“):

Behalten_NT₂: $F_{(1,101)} = 2,410 ; n.s.$ $M_B = J_B$

NT₃: $F_{(1,101)} = 7,706 ; p = ,008^{**} ; \eta^2 = ,138$ $J_B > M_B$, mittlerer bis großer Effekt.

Die Mädchengruppe M_B hat mehr Sendungen mit physikalischen Themen angeschaut als die Gruppe J_B (Tabelle E.4-2, $p = ,060$ (t); U-Test). Dies deutet auf ein höheres physikalisches Interesse von Mädchen hin (Abschnitt 8.3.1). Die Kovarianzanalyse zeigt, dass die Mädchengruppe aus diesem Grund in der Behaltensleistung NT₂ ein besseres Ergebnis als die Jungen erzielt hat. Die Verstärkung des Effekts nach der Kovarianzanalyse im speziellen Wissenstest NT₃ sagt im Gegensatz dazu: Wenn die Mädchen nicht so viele physikalische Sendungen geschaut hätten, würden die Jungen noch besser abschneiden.

Mädchen vs. Jungen		t_i_Gesamt	$t_i_Hören$	$t_i_Auswählen$	$t_i_Animation$	t_i_Lesen
1. Teil (t ₁)	B (t _M > t _J)	,098 (t)	n.s.	n.s.	-	,015*
	A	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
2. Teil (t ₂)	B (t _M > t _J)	,035*	n.s.	n.s.	-	,001***
	A	n.s.	n.s.	n.s.	,072 (t) (t _J > t _M)	n.s.
(t ₁ + t ₂)	B (t _M > t _J)	,032*	n.s.	n.s.	-	,001***
	A	n.s.	n.s.	n.s.	,066 (t) (t _J > t _M)	n.s.

Tabelle 9-15: Unterschiede in der Bearbeitungszeit zwischen Mädchen (t_M) und Jungen (t_J) in der Bild- und Animationsversion des Lernprogramms.

Die Analyse der Bearbeitungszeiten deckt weitere Unterschiede zwischen Mädchen und Jungen auf. Aus der Tabelle 9-15 ist abzulesen, dass die Mädchen insgesamt mehr Zeit mit der Bildversion des Lernprogramms verbracht haben als die Jungen mit der gleichen Programmversion. Dieser Unterschied stammt von der signifikant höheren Lesezeit der Mädchen ($p = ,015^*$ bzw. $p = ,001^{***}$; U-Test). Die Varianzanalyse mit der Kovariate „Lesezeit“ (abhängige Variablen: Behalten_NT₂; fester Faktor: „Geschlecht“; Kovariaten: VT₃, t₂_Lesen) zeigt:

Behalten_NT₂: $F_{(1,101)} = 3,613 ; p = ,063$ (t); $\eta^2 = ,070$ $M_B > J_B$

NT₃: $F_{(1,101)} = 5,572 ; p = ,022^* ; \eta^2 = ,106$ $J_B > M_B$, mittlerer bis großer Effekt.

Da der Effekt in Behalten_NT₂ durch die Kovariate „Lesezeit“ geschwächt wird, hat die höhere Lesezeit den Wissenserwerb von Mädchen gefördert. Das Interesse von Mädchen an physikalischen Inhalten steht mit ihren längeren Lesezeiten im Einklang. Der Effekt $M_B > J_B$ in der Behaltensleistung NT₂ war also eine multikausale Erscheinung.

Fazit: Die erhaltenen Unterschiede in der Lernleistung sind auf ein *Vorwissenseffekt* bei den Jungen und auf ein erhöhtes physikalisches Interesse bei den Mädchen zurückzuführen. Die eingesetzten Bilder spielen dabei keine Rolle. Es gilt: Mädchen und Jungen lernen gleich gut mit den Bildern des Lernprogramms ($M_B = J_B$).

Vergleich der Geschlechter in der Animationsgruppe (J_A vs. M_A)

In der Animationsversion des Lernprogramms sind die Geschlechtsunterschiede in der Lesezeit nicht mehr vorhanden (Tabelle 9-15). Die Mädchen ändern nicht ihr Leseverhalten, die Jungen aber lesen mehr. Die Jungen verbringen auch im Trend mehr Zeit mit dem Anschauen von Animationen als die Mädchen. Die Wirkung dieser erhöhten Betrachtungs- und Lesezeit zeigt sich aber nicht in ihrer Lernleistung (Tabelle E.3-5, E.4-2). Es gilt für alle Subskalen des Wissenstests $J_A = M_A$.

Vergleich der visuellen Repräsentationen innerhalb der Mädchengruppe (M_A vs. M_B)

Betrachtet man den Lernvorteil für Animationen in Behalten_LT₁ (Abschnitt 9.4) genauer, wird deutlich, dass die Mädchen für den Effekt verantwortlich sind (Tabelle E.3-6). Der nicht-parametrische U-Test liefert nämlich einen signifikanten Unterschied zwischen den Mädchengruppen mit Bildern und denen mit Animationen (Behalten_LT₁, $p = ,016^*$). Entsprechend zeigt die Varianzanalyse mit dem Faktor „Visualisierungsart“ einen signifikant positiven Haupteffekt. Da zwischen Behalten_LT₁ und Vorwissen in der Mädchengruppe eine signifikante Korrelation besteht ($r = ,490^{**}$; $p = ,000^{***}$), kann die Varianzanalyse mit der Kovariate Vorwissen durchgeführt werden. Der Haupteffekt von Animationen wird durch diese Analyse weiter gestärkt ($M_A > M_B$, mittlerer bis großer Effekt):

Behalten_LT₁: $F_{(1,101)} = 7,078$; $p = ,010^{**}$; $\eta^2 = ,118$) \rightarrow ($F_{(1,101)} = 10,174$; $p = ,002^{**}$; $\eta^2 = ,164$).

Die Kontrollvariablen (Tabelle E.4-3) liefern noch weitere Informationen über diesen Effekt. In der Treatmentgruppe (M_A vs. M_B) wird die Kontrollvariable „TV-Sendungen zur Physik“ zur Kovariate ($p = ,008^{**}$; U-Test). Wenn man diese Kovariate in der Varianzanalyse berücksichtigt (abhängige Variable: Behalten_LT₁; fester Faktor: „Visualisierungsart“, Kovariate: „TV-Sendungen zur Physik“), bleibt der Effekt von Animationen in der Mädchengruppe:

Behalten_LT₁: $F_{(1,101)} = 9,809$; $p = ,003^{**}$; $\eta^2 = ,159$ ($M_A > M_B$, mittlerer bis großer Effekt).

Ohne das höhere physikalische Interesse der Bildergruppe, was vermutlich auch mit einer größeren Lernbereitschaft einherging, hätte die Bildergruppe noch schlechter abgeschieden. Die Animationen unterstützen das langfristige Behalten des Wissens bei den Mädchen.

In der Gesamtzeit der Bearbeitung des Lernprogramms unterscheiden sich die Treatmentgruppen M_A vs. M_B nicht voneinander (Tabelle 9-16). Die signifikanten Unterschiede in der Hör- und Animationszeit sind zwar trivial, trotzdem gibt die Animationszeit Auskunft über die

Lernwirksamkeit von Animationen. Als Kovariate in der Varianzanalyse führt sie zu folgendem Ergebnis:

Behalten_{LT1}, KoV „t₁_Animation“: $F_{(1,101)} = 0,191$; n.s.

Der signifikante Unterschied verschwindet zwischen den Treatmentgruppen, d.h. die Animationszeit war entscheidend für den Lernerfolg der Mädchen.

Fazit: Mädchen, die mit Animationen gearbeitet haben, erzielen langfristig eine bessere Behaltensleistung, als Mädchen, die mit der Bildversion des Lernprogramms gelernt haben. Dies gilt allerdings nur für den ersten Teil des Lernprogramms.

Die Jungen verbringen zwar mehr Zeit mit der Animationsversion des Lernprogramms als mit der Bildversion (Tabelle 9-16); diese verlängerte Bearbeitungszeit wirkt sich aber auf das Lernen nicht aus (Tabelle E.3-6): $J_A = J_B$.

Bild vs. Animation		t _i _Gesamt	t _i _Hören	t _i _Auswähle n	t _i _Animation	t _i _Lesen
1. Teil (t ₁)	M (t _A > t _B)	n.s.	,000***	n.s.	,000***	n.s.
	J (t _A > t _B)	,066 (t)	,000***	n.s.	,000***	,098 (t)
2. Teil (t ₂)	M (t _A > t _B)	n.s.	,000***	n.s.	,000***	n.s.
	J (t _A > t _B)	,054 (t)	,000***	n.s.	,000***	,051 (t)

Tabelle 9-16: Vergleich der visuellen Repräsentationen innerhalb der Mädchen- bzw. Jungengruppe in Bezug auf die Bearbeitungszeit (M - Mädchengruppe, J - Gruppe der Jungen, p-Werte sind mit U-Tests ermittelt, t_A > t_B bezieht sich auf die mittlere Verweildauer der Gruppen und damit auf die ganze Zeile in der Tabelle).

9.5.2 Räumliches Vorstellungsvermögen

Für die Teilung der Stichprobe nach räumlichem Vorstellungsvermögen wird der Median verwendet (Md = 18, Abschnitt 9.1). Die Schüler, die auf dem Median liegen (N_{Md} = 15), werden in der Analyse nicht berücksichtigt. Damit werden zwei Extremgruppen gebildet, die über ein niedriges (RV-) bzw. hohes (RV+) räumliches Vorstellungsvermögen verfügen (N_{RV-} = 47, N_{RV+} = 40). Die beiden Extremgruppen werden dann in Subskalen des Wissenstests verglichen (Tabelle E.3-9). Da im Auswertungsprogramm SPSS bei dem multivariaten Test MANOVA von den Codierungen 0 (RV_{Md}), 1 (RV-), 2 (RV+) für den Vergleich 1 und 2 nicht ausgewählt werden können, wird der t- bzw. U-Test verwendet. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse stellt Tabelle 9-17 dar. Obwohl die beiden Gruppen im Vorwissen nicht unterschiedlich waren, ist der Unterschied zwischen den Gruppen (RV-) und (RV+) in der Lernleistung signifikant: Schüler mit hohem räumlichen Vorstellungsvermögen haben eine bessere Lernleistung als Schüler mit niedrigen erreicht (s. auch Tabelle E.3-9, (RV+) > (RV-), großer Effekt). Damit hat sich *Hypothese 5.1* bestätigt.

Um die *Forschungsfrage 7* differenzierter beantworten zu können, werden die Unterschiede zwischen Schülern mit niedrigem und hohem RV innerhalb von Visualisierungsarten „Bild“ vs. „Animation“ betrachtet. Für diese Vergleiche kann MANOVA aus vorhin schon genannten Gründen nicht gerechnet werden. Die Daten werden entsprechend ihrer Verteilungsform mit dem t- bzw. U-Test analysiert. In allen Gruppenvergleichen ((RV_B+) vs. (RV_B-), (RV_A+) vs. (RV_A-)) hat der t-Test für die abhängige Variable VT₃ keine signifikante Ergebnisse gebracht. Das Vorwissen muss also als Kovariate nicht berücksichtigt werden.

(RV+) vs. (RV-)					
Nachtest	Test	Signifikanz	Langzeittest	Test	Signifikanz
Behalten_NT ₁	U	,000***	Behalten_LT ₁	U	,004**
Behalten_NT ₂	U	,003**	Behalten_LT ₂	U	,009**
Transfer_NT ₁	t	,001***	Transfer_LT ₁	t	,003**
Transfer_NT ₂	t	,090 (t)	Transfer_LT ₂	t	,024*
Gesamt_NT ₁	t	,000***	Gesamt_LT ₁	t	,001***
Gesamt_NT ₂	U	,008**	Gesamt_LT ₂	t	,003**
NT ₃	t	,014*	LT ₃	t	,002**

Tabelle 9-17: Vergleich der Schülergruppen mit niedrigen und hohen räumlichen Vorstellungsvermögen in Subskalen des Wissenstests. Für die Unterschiede in der Lernleistung gilt: (RV+) > (RV-).

(RV _B +) vs. (RV _B -)					
Nachtest	Test	Signifikanz	Langzeittest	Test	Signifikanz
Behalten_NT ₁	U	,013*	Behalten_LT ₁	U	,000***
Behalten_NT ₂	t	,001***	Behalten_LT ₂	U	,006**
Transfer_NT ₁	t	,011*	Transfer_LT ₁	t	,045*
Transfer_NT ₂	t	,007**	Transfer_LT ₂	t	,009**
Gesamt_NT ₁	t	,002**	Gesamt_LT ₁	t	,003**
Gesamt_NT ₂	t	,000***	Gesamt_LT ₂	t	,001***
NT ₃	t	,076 (t)	LT ₃	t	,011*

Tabelle 9-18: Vergleich der Schülergruppen mit niedrigen und hohen RV innerhalb der Bildergruppe in Subskalen des Wissenstests. Für die Unterschiede in der Lernleistung gilt: (RV_B+) > (RV_B-).

(RV _{A+}) vs. (RV _{A-})					
Nachtest	Test	Signifikanz	Langzeittest	Test	Signifikanz
Behalten_NT ₁	U	,006**	Behalten_LT ₁	U	n.s.
Behalten_NT ₂	U	n.s.	Behalten_LT ₂	t	n.s.
Transfer_NT ₁	t	,025*	Transfer_LT ₁	t	,030*
Transfer_NT ₂	t	n.s.	Transfer_LT ₂	t	n.s.
Gesamt_NT ₁	t	,005**	Gesamt_LT ₁	t	,093 (t)
Gesamt_NT ₂	t	n.s.	Gesamt_LT ₂	t	n.s.
NT ₃	t	,098 (t)	LT ₃	t	,070 (t)

Tabelle 9-19: Vergleich der Schülergruppen mit niedrigen und hohen RV innerhalb der Animationsgruppe in Subskalen des Wissenstests. Für die Unterschiede in der Lernleistung gilt:

$$(RV_{A+}) > (RV_{A-}).$$

Wenn man sich auf die Schüler der Bildergruppe fokussiert, sind die Unterschiede zwischen den Gruppen „RV niedrig“ und „RV hoch“ signifikant (Tabelle 9-18). Innerhalb der Bildergruppe wird auch bestätigt, dass Schüler mit hohem RV trotz gleichem Vorwissen eine bessere Lernleistung als Schüler mit niedrigen RV erreichen (Tabelle E.3-11). Dies wiederum kann nicht vollständig über die Schüler, die mit Animationsversion des Lernprogramms gearbeitet haben, behauptet werden (Tabelle 9-19, s. auch Tabelle E.3-11): Im Wissenstest zum zweiten Teil des Lernprogramms erreichen die Schülergruppen (RV_{A-}) und (RV_{A+}) die gleiche Lernleistung: (RV_{A+}) = (RV_{A-}). Im Wissenstest zum ersten Teil des Lernprogramms sind wiederum signifikante Unterschiede festzustellen: (RV_{A+}) > (RV_{A-}). Es kann bedeuten, dass sich der markante Unterschied zwischen den Schülern mit niedrigen und hohen RV durch die Intervention „Animation“ aufhebt. Um dieses Indiz zu untersuchen, werden vergleichende Analysen in Hinsicht auf die visuelle Gestaltung innerhalb der Schülergruppe mit niedrigen RV unternommen ((RV_{B-}) vs. (RV_{A-})):

In diesem Datensatz der Schüler sind die Werte der Subskalen des Wissenstests normalverteilt. Es besteht weiterhin eine Homogenität der Varianzen. Damit sind die Voraussetzungen für den Einsatz der univariaten Varianzanalyse (abhängige Variablen: jeweils die Subskalen des Wissenstests; fester Faktor: „Visualisierungsart“ und „Notizen“) erfüllt. Im Folgenden werden nur signifikante Ergebnisse zu dem Faktor „Visualisierungsart“ und die entsprechenden deskriptiven Statistiken berücksichtigt (Tabelle 9-20 und Tabelle E.3-10). Anhand dessen zeigen Schüler der Animationsgruppe einen größeren Wissenserwerb als Schüler der Bildergruppe. Dies gilt sowohl für die Behaltens- als auch für die Transferleistung ((RV_{A-}) > (RV_{B-})), mittlere bis große Effekte und großer Effekt). Schüler mit niedrigem räumlichen Vorstellungsvermögen können also tatsächlich aus den Animationen profitieren. *Hypothese 5.2* kann bestätigt werden.

Zum Schluss soll die Schülergruppe mit hohem RV in Hinsicht auf die Visualisierung untersucht werden ((RV_A +) vs. (RV_B +)). Die Werte der jeweiligen Subskalen der Wissenstests sind, bis auf drei Ausnahmen, normalverteilt. Dementsprechend wird die univariate Varianzanalyse durchgeführt bzw. der U-Test verwendet. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 9-21 zusammengefasst. Bei den Schülern mit hohem RV können keine Unterschiede in der Lernleistung zwischen den Gruppen „Bild“ und „Animation“ festgestellt werden. Damit ist auch *Hypothese 5.3* bestätigt, es gilt (RV_A +) = (RV_B +) für alle Skalen der Wissenstests.

Die geringeren Unterschiede in der Lernleistung zwischen den Gruppen (RV_A +) und (RV_A -) können tatsächlich auf die positive Wirkung von Animationen auf die Schülergruppe (RV-) zurückgeführt werden: Animationen sind also besonders hilfreich für Schüler mit niedrigem räumlichem Vorstellungsvermögen.

Da zwischen den Untersuchungsgruppen kein Unterschied im Vorwissen besteht (univariate Varianzanalyse, abhängige Variable: VT₃, fester Faktor: „Visualisierungsart“, für beide Gruppen (RV-) und (RV+) gilt: $F_{(1,101)} < 1,0$; n.s.), werden die beschriebenen Ergebnisse vom VT₃ nicht beeinflusst.

(RV _B -) vs. (RV _A -)			
Subskalen der Wissenstests	F _(1,101)	Signifikanz	Effektstärke η^2
Behalten_NT ₂	6,085	,018*	,124
Transfer_NT ₂	5,157	,028*	,107
Gesamt_NT ₂	7,298	,010**	,145
Behalt_LT ₁	13,446	,001***	,238
Gesamt_LT ₁	4,701	,036*	,099

Tabelle 9-20: Ergebnisse der univariaten Varianzanalyse für den Gruppenvergleich (RV_B -) vs. (RV_A -). Für die Unterschiede in der Lernleistung gilt: (RV_A -) > (RV_B -).

(RV _A +) vs. (RV _B +)					
Nachtest	F _(1,101)	p	Langzeittest	F _(1,101)	p
Behalten_NT ₁	-	n.s.	Behalten_LT ₁	-	n.s.
Behalten_NT ₂	-	n.s.	Behalten_LT ₂	1,035	n.s.
Transfer_NT ₁	1,164	n.s.	Transfer_LT ₁	,758	n.s.
Transfer_NT ₂	,647	n.s.	Transfer_LT ₂	,011	n.s.
Gesamt_NT ₁	1,174	n.s.	Gesamt_LT ₁	,521	n.s.
Gesamt_NT ₂	1,018	n.s.	Gesamt_LT ₂	,213	n.s.
NT ₃	2,701	n.s.	LT ₃	,004	n.s.

Tabelle 9-21: Ergebnisse der univariaten Varianzanalyse und des U-Tests (markiert mit „-“) für den Gruppenvergleich (RV_A +) vs. (RV_B +). Es gilt: (RV_A +) = (RV_B +).

9.5.3 Sprachliche Fähigkeiten

Für die Teilung der Stichprobe nach sprachlichen Fähigkeiten wird der Mittelwert verwendet ($M = 15,3$; Abschnitt 9.1). Schüler, die unter dem Mittelwert liegen, werden in die Gruppe (SF-), Schüler über dem Mittelwert in die Gruppe (SF+) eingeteilt. In der Analyse werden also alle Schüler berücksichtigt ($N_{SF-} = 48$, $N_{SF+} = 54$). Zwischen diesen Schülergruppen besteht ein signifikanter Unterschied im Vorwissen VT_3 (t-Test: $t = -2,214$; $df = 100$; $p = ,029^*$; $\delta = 0,41$), deswegen wird ihr Vergleich unter diesem Aspekt durchgeführt (Tabelle 9-22, Varianzanalyse mit der Kovariate VT_3 , abhängige Variablen: normalverteilte Subskalen der Wissenstests, fester Faktor: „sprachliche Fähigkeiten“). Für die Subskalen der Wissenstests, die nicht normalverteilt sind, wird ein U-Test verwendet (Tabelle 9-23). Um die Effektstärke auch für diese Skalen einschätzen zu können, werden auch Kovarianzanalysen durchgeführt, deren Ergebnisse ebenfalls in der Tabelle 9-23 zusammengefasst sind.

Es konnten signifikante Unterschiede sowohl in der kurzfristigen, als auch in der langfristigen Lernleistung gefunden werden: Schüler mit hohen sprachlichen Fähigkeiten erreichen eine bessere Lernleistung als Schüler mit niedrigen sprachlichen Fähigkeiten (Tabelle E.3-14, (SF+) > (SF-), kleiner bis mittlerer Effekt). Die gerichtete *Hypothese 6.1* kann für bestimmte Subskalen der Wissenstests bestätigt werden.

(SF-) vs. (SF+)			
Subskalen der Wissenstests	$F_{(1,101)}$	Signifikanz	Effektstärke η^2
Transfer_NT ₁	4,621	,034*	,045
Transfer_NT ₂	1,612	n.s.	-
Gesamt_NT ₁	7,265	,008**	,068
Transfer_LT ₁	6,207	,014*	,059
Transfer_LT ₂	,906	n.s.	-
Gesamt_LT ₁	4,202	,043*	,041
Gesamt_LT ₂	1,681	n.s.	-
NT ₃	1,087	n.s.	-
LT ₃	2,801	$p < 0,5$ einseitig	,028

Tabelle 9-22: Ergebnisse der multivariaten Kovarianzanalyse für den Gruppenvergleich (SF-) vs. (SF+). Für die Unterschiede gilt: (SF+) > (SF-).

(SF-) vs. (SF+)				
Subskalen der Wissenstests	U-Test	Varianzanalyse mit der Kovariate VT ₃		
	Signifikanz	F _(1,101)	Signifikanz	Effektstärke η^2
Behalten_NT ₁	,007**	5,400	,022*	,052
Behalten_NT ₂	,037*	2,893	p < 0,5 einseitig	-
Gesamt_NT ₂	,022*	2,991	p < 0,5 einseitig	-
Behalten_LT ₁	n.s.	,421	n.s.	-
Behalten_LT ₂	,070 (t)	1,522	n.s.	-

Tabelle 9-23: Ergebnisse des U-Tests und der multivariaten Kovarianzanalyse für den Gruppenvergleich (SF-) vs. (SF+). Für die Unterschiede gilt: (SF+) > (SF-).

Der Vergleich (SF-) vs. (SF+) wird auch innerhalb der Bilder- bzw. Animationsgruppe durchgezogen (Tabelle E.3-15). Da diese Untersuchungsgruppen sich im Vorwissen VT₃ nicht unterscheiden (t-Test: Bildergruppe $t = -1,607$; $df = 50$; n.s.; Animationsgruppe $t = -1,485$; $df = 48$; n.s.), vereinfacht sich die Analyse. Für die nicht normalverteilten Subskalen des Wissenstests wird der U-Test und für die normalverteilten Subskalen die multivariate Varianzanalyse gerechnet (MANOVA, fester Faktor: „sprachliche Fähigkeiten“). Die multivariate Varianzanalyse ergibt keinen Haupteffekt (Bildergruppe: $F(11, 91) = 1,312$; n.s.; Animationsgruppe: $F(11, 91) = 1,331$; n.s.). Die Ergebnisse der anschließenden univariaten Varianzanalysen sind in der Tabelle 9-24 und 9-25 dargestellt.

Die sprachlichen Fähigkeiten als moderierende Variable sind für das Lernen mit unterschiedlichen Visualisierungen nicht bekannt (Höffler, 2007, S.23-25). Anhand der Literatur konnten also keine gerichteten Hypothesen aufgestellt werden, deshalb bleiben die Trends an dieser Stelle auf einer marginal signifikanten Ebene. Signifikante Unterschiede zeigen sich in der Bildergruppe sowohl in der kurzfristigen, als auch in der langfristigen Lernleistung zum ersten Teil des Lernprogramms (Tabelle 9-24), dabei gilt (Tabelle E.3-15): (SF_{B+}) > (SF_{B-}). In der Animationsgruppe zeigen sich signifikante Unterschiede zwar in allen Teilen des Wissenstests, jedoch nicht für alle Subskalen (Tabelle 9-25): (SF_{A+}) > (SF_{A-}). Anhand dieser Ergebnisse kann man zusammenfassend sagen, dass Schüler mit hohen sprachlichen Fähigkeiten sowohl mit Animationen als auch mit Bildern bessere Lernergebnisse als Schüler mit niedrigen sprachlichen Fähigkeiten erreichen. In beiden Fällen handelt es sich um kleinere bis mittlere, und auch mittlere bis große Effekte. Diese Ergebnisse sind im Einklang mit dem Ergebnis zu der *Hypothese 6.1*: Der Lernvorteil von Schüler mit hohen sprachlichen Fähigkeiten ist auch innerhalb der Treatmentgruppen Bild vs. Animation bleibt erhalten.

Im nächsten Schritt wird die Auswirkung der Visualisierungsarten (Bild vs. Animation) innerhalb der Gruppen mit niedrigen bzw. hohen sprachlichen Fähigkeiten untersucht (Tabelle E.3-16). Es wird dabei für die nicht normalverteilten Subskalen des Wissenstests der U-Test gerechnet (Gruppe (SF-): Behalten_NT₂; Gruppe (SF+): Behalten_NT_i, Behalten_LT_i, $i = 1, 2$). Für die normalverteilten Subskalen wird die multivariate Varianzanalyse eingesetzt (MANOVA, abhängige Variablen: normalverteilte Subskalen des Wissenstests, fester Faktor: „Visuali-

sierungsart“). Sowohl in der Gruppe „SF niedrig“ ($F_{(13, 89)} < 1,0$, n.s.) als auch bei „SF hoch“ ($F_{(10, 92)} < 1,0$, n.s.) ergibt sich für die Visualisierungsart kein Haupteffekt. Der Wissenserwerb der Schüler mit niedrigen bzw. hohen sprachlichen Fähigkeiten wird also durch die Visualisierung des Lernangebots nicht beeinflusst: $(SF_B +) = (SF_A +)$, $(SF_B -) = (SF_A -)$.

(SF _{B+}) vs. (SF _{B-})							
Nachtest	F _(1,101)	p	η ²	Langzeittest	F _(1,101)	p	η ²
Behalten_NT ₁	-	,042*		Behalten_LT ₁	-	n.s.	
Behalten_NT ₂	,687	n.s.		Behalten_LT ₂	-	n.s.	
Transfer_NT ₁	5,293	,026*	,096	Transfer_LT ₁	6,845	,012*	,120
Transfer_NT ₂	3,393	,071 (t)	,064	Transfer_LT ₂	1,765	n.s.	
Gesamt_NT ₁	6,477	,014*	,115	Gesamt_LT ₁	5,749	,020*	,103
Gesamt_NT ₂	2,825	,099 (t)	,053	Gesamt_LT ₂	,527	n.s.	
NT ₃	3,661	,061 (t)	,068	LT ₃	3,188	,080 (t)	,060

Tabelle 9-24: Ergebnisse der univariaten Varianzanalyse und des U-Tests (markiert mit „-“) für den Gruppenvergleich (SF_{B+}) vs. (SF_{B-}). Es gilt: $(SF_B +) > (SF_B -)$.

(SF _{A+}) vs. (SF _{A-})							
Nachtest	F _(1,101)	p	η ²	Langzeittest	F _(1,101)	p	η ²
Behalten_NT ₁	-	,072 (t)		Behalten_LT ₁	-	n.s.	
Behalten_NT ₂	-	,035*		Behalten_LT ₂	7,964	,007**	,142
Transfer_NT ₁	3,645	,062 (t)	,071	Transfer_LT ₁	3,700	,060 (t)	,072
Transfer_NT ₂	1,119	n.s.		Transfer_LT ₂	1,344	n.s.	
Gesamt_NT ₁	5,700	,021*	,106	Gesamt_LT ₁	3,030	,088 (t)	,059
Gesamt_NT ₂	2,679	n.s.		Gesamt_LT ₂	4,811	,033*	,091
NT ₃	1,058	n.s.		LT ₃	4,112	,048*	,079

Tabelle 9-25: Ergebnisse der univariaten Varianzanalyse und des U-Tests (markiert mit „-“) für den Gruppenvergleich (SF_{A+}) vs. (SF_{A-}). Es gilt: $(SF_A +) > (SF_A -)$.

9.6 Einfluss der Anfertigung von Notizen auf den Lernerfolg

Die mittleren Summenscores aller Schüler der jeweiligen Treatmentgruppe („keine Notizen“ vs. „Notizen“) stellt die Tabelle E.3-3 dar. Der Anteil der richtigen Lösungen beträgt in allen Subskalen des Wissenstests (Behalten und Transfer: $\sum_{i=1,2,3} NT_i + \sum_{i=1,2,3} LT_i$, Tabelle E.3-3) in der Notizengruppe 58% und in der Gruppe ohne Notizen 55%. Die numerischen Daten der kurzfristigen Behaltensleistung (Behalten_NT₁, Behalten_NT₂) zeigen jedoch einen deutlichen Lernvorteil der Gruppe „Notizen“ gegenüber der Gruppe „keine Notizen“.

Da eine Normalverteilung der abhängigen Variable (Behalten_NT₁, Behalten_NT₂) in der Stichprobe nicht vorliegt, ist die Voraussetzung für ein parametrisches Testverfahren nicht gegeben: Es wird der U-Test verwendet. Der nichtparametrische Vergleich von den Gruppen „Notizen“ vs. „keine Notizen“ ergibt eine Tendenz in der Behaltensleistung. Diese Tendenz kann aber wegen der gerichteten *Hypothese 3* (Abschnitt 8.1) als ein signifikanter Unterschied in der Behaltensleistung zwischen den Gruppen „Notizen“ vs. „keine Notizen“ gedeutet werden (Behalten_NT₁: $p < ,05$; Behalten_NT₂: $p < ,05$; beide einseitig getestet; Bortz & Döring, 2003, S.497ff). Die Schülergruppe mit Notizen ist also in der kurzfristigen Behaltensleistung statistisch bedeutsam besser als die Gruppe ohne Notizen. Dieses Ergebnis ist doppelt gesichert, weil die Analyse des Wissenstests zum zweiten Teil des Lernprogramms (T₂) zum gleichen Ergebnis kommt wie die Analyse zum ersten Teil des Lernprogramms (T₁). Die Reproduzierbarkeit des Ergebnisses ist bestätigt.

Die Gruppen „Notizen“ vs. „keine Notizen“ unterscheiden sich im Vorwissen nicht (t-Test: $t = -0,604$; $df = 100$; $p = ,547$), d.h. der Einfluss des Vorwissens ist in jeder Gruppe gleich. Das macht die Durchführung einer Varianzanalyse mit Kovariate VT₃ unnötig. Es wird jedoch – wie im Abschnitt 9.4 – das Ergebnis mit der univariaten Varianzanalyse ebenfalls überprüft. Diese Analyse mit dem Faktor „Notizen“ zeigt auch einen signifikant positiven Haupteffekt ($N > kN$, kleiner bis mittlerer Effekt):

Behalten_NT₁: $F_{(1,101)} = 3,359$; $p < ,05$; einseitig getestet

Behalten_NT₂: $F_{(1,101)} = 4,494$; $p = ,037^*$; $\eta^2 = ,044$.

Im Langzeittest verschwindet der durch die Anfertigung von Notizen erreichte positive Effekt im Behaltensbereich. Damit wird die, in der *Hypothese 3* formulierte Erwartung belegt, dass die Schüler mehr Faktenwissen mit den Notizen für eine gewisse Zeit behalten als ohne Notizen.

Dieses Ergebnis ändert sich, wenn man die Kontrollvariablen in Betracht zieht (Tabelle E.4-4). Die Treatmentgruppen „Notizen“ vs. „keine Notizen“ unterscheiden sich in den Kontrollvariablen „Physiknote“ (U-Test, $p = ,004^{**}$) und „Selbstwirksamkeitserwartung für das Fach Physik“ (S-Skala, t-Test, $t = -2,144$; $df = 100$; $p = ,034^*$). In der Notizengruppe sind also Schüler, die eine bessere Schulleistung in der Physik erzielen und gleichzeitig auch eine höhere Selbstwirksamkeitserwartung haben. Aus der entsprechenden Kovarianzanalyse folgt, dass diese zwei Kovariaten den Unterschied in der Behaltensleistung verursacht haben:

Behalten_NT₁, KoV „Physiknote“: $F_{(1,101)} = 1,945$; n.s

Behalten_NT₁, KoV „S-Skala“: $F_{(1,101)} = 2,180$; n.s

Behalten_NT₂, KoV „Physiknote“: $F_{(1,101)} = 2,326$; n.s

Behalten_NT₂, KoV „S-Skala“: $F_{(1,101)} = 3,975$; $p = ,049^*$; $\eta^2 = ,039$

In der Lernleistung Behalten_NT₂ kann der Effekt von Notizen nur durch die Kovariate „Physiknote“ gelöscht werden. Die „Physiknote“ ist deshalb ein stärkerer Einflussfaktor, als die subjektive Selbsteinschätzung „Selbstwirksamkeitserwartung“.

Der statistische Vergleich von Gruppen „Notizen“ vs. „keine Notizen“ in der Bearbeitungszeit zeigt signifikante Unterschiede in beiden Teilen des Lernprogramms (Gesamt_ t_i : $p = ,000^{***}$; U-Test, Tabelle 9-26). Die Vermutung über den Einfluss der Bearbeitungszeit (*Hypothese 5*) ist damit plausibel: In der Notizengruppe verlängert sich instruktionsbedingt die Bearbeitungszeit des Lernprogramms ($t_{kN} < t_N$). Dies betrifft nicht nur die trivialen Lese- und Auswahlseite (Lesen_ t_i , Auswählen_ t_i : $p = ,000^{***}$; U-Test für beide Teile des Lernprogramms; $i = 1, 2$), sondern die Notizengruppe verbringt auch tendenziell mehr Zeit mit den Animationen (für die Summe aller Animationszeiten ($t_1_Animation + t_2_Animation$): $p = ,059$; U-Test). Die Tendenz auf der Hörseite (Hören_ t_2 : $p = ,055$; U-Test) kann man damit erklären, dass die Schüler mit der Animationsversion des Lernprogramms schon hier Notizen angefertigt haben. In der anschließenden Varianzanalyse mit der Kovariate „Bearbeitungszeit“ wird der Effekt von Notizen neutralisiert (Behalten_NT₁: $F_{(1,101)} = 1,598$, n.s. ; Behalten_NT₂: $F_{(1,101)} < 1,0$, n.s.). D.h., den Effekt der Notizen hat, zusätzlich zu den zwei Kovariaten, die verlängerte Bearbeitungszeit ausgelöst.

Fazit: Der kurzfristige positive Effekt in der Behaltensleistung verliert an empirischer Relevanz: Die Notizen haben keinen Vorteil für den Lernprozess gebracht. Ihr Effekt hat sich als Einfluss der Kovariaten „Physiknote“ , „Selbstwirksamkeitserwartung für das Fach Physik“ und „Bearbeitungszeit“ entpuppt.

Notizen vs. keine Notizen		t_i_Gesamt	$t_i_Hören$	$t_i_Auswählen$	$t_i_Animation$	t_i_Lesen
1. Teil (t_1)	N	2135,8 (35,6 min)	704,9 (33 %)	790,3 (37 %)	182,5 (9 %)	634,5 (30 %)
	kN	908,1 (15,1 min)	718,8 (79 %)	128,9 (14 %)	158,4 (17 %)	62,1 (7 %)
	p	,000***	n.s.	,000***	,096	,000***
2. Teil (t_2)	N	1233,6 (20,6 min)	509,2 (41 %)	484,1 (39 %)	121,3 (10 %)	241,6 (20 %)
	kN	615,1 (10,3 min)	500,2 (81 %)	84,8 (14 %)	104,3 (17 %)	31,5 (5 %)
	p	,000***	,055	,000***	n.s.	,000***

Tabelle 9-26: Mittlere Verweildauer von den Treatmentgruppen „Notizen“ vs. „keine Notizen“ auf den unterschiedlichen Seitentypen im ersten und zweiten Teil des Lernprogramms und ihr statistischer Vergleich.

9.7 Einfluss der Lernermerkmale und von Notizen auf den Lernerfolg

9.7.1 Geschlecht

Vergleich der Geschlechter innerhalb der Notizengruppe: M_N vs. J_N

Der signifikante Unterschied zwischen den Gruppen Mädchen vs. Jungen im speziellen Wissenstest (Abschnitt 9.5.1, Tabelle E.3-4) ist auf die Notizengruppe zurückzuführen (Tabelle E.3-7). Die univariate Varianzanalyse für die Notizengruppe (abhängige Variablen: VT_3 , NT_3 , LT_3 ; fester Faktor: „Geschlecht“) ergibt signifikante Unterschiede zwischen den Mädchen und Jungen:

Vortest (VT_3): $F_{(1,101)} = 5,222$; $p = ,027^*$; $\eta^2 = ,102$ ($J_N > M_N$, mittlerer bis großer Effekt),

Nachtest (NT_3): $F_{(1,101)} = 15,883$; $p = ,000^{***}$; $\eta^2 = ,257$ ($J_N > M_N$, großer Effekt),

Langzeittest (LT_3): $F_{(1,101)} = 6,722$; $p = ,013^*$; $\eta^2 = ,127$ ($J_N > M_N$, mittlerer bis großer Effekt).

Wenn man in der Varianzanalyse mit dem Vorwissen VT_3 als Kovariate rechnet, verschwindet der Unterschied in der langfristigen Lernleistung LT_3 ($F_{(1,101)} = 2,147$; n.s.). Weitere Effekte bleiben jedoch erhalten (abhängige Variablen: NT_3 , $Transfer_NT_2$, $Gesamt_NT_2$; fester Faktor: „Geschlecht“; Kovariate: VT_3):

NT_3 : ($F_{(1,101)} = 15,883$; $p = ,000^{***}$; $\eta^2 = ,257$) \rightarrow ($F_{(1,101)} = 9,402$; $p = ,004^{**}$; $\eta^2 = ,173$),

$Transfer_NT_2$: ($F_{(1,101)} = 7,400$; $p = ,009^{**}$; $\eta^2 = ,139$) \rightarrow ($F_{(1,101)} = 4,152$; $p = ,047^*$; $\eta^2 = ,084$),

$Gesamt_NT_2$: ($F_{(1,101)} = 5,532$; $p = ,023^*$; $\eta^2 = ,107$) \rightarrow ($F_{(1,101)} = 3,719$; $p = ,060$ (t); $\eta^2 = ,076$).

Fazit: Jungen, die Notizen angefertigt haben, erzielen einen größeren kurzfristigen Lernerfolg als Mädchen mit Notizen ($J_N > M_N$, mittlerer bis großer Effekt bzw. kleinere bis mittlere Effekte). Da zwischen diesen Treatmentgruppen kein Unterschied in den Kontrollvariablen besteht (Tabelle E.4-5), bleibt dieses Ergebnis unverändert.

Vergleich der Geschlechter innerhalb der Gruppe ohne Notizen: M_{kN} vs. J_{kN}

In der Treatmentgruppe „ohne Notizen“ (Tabelle E.3-7) zeigen sich keine Unterschiede zwischen Mädchen und Jungen in den Kontrollvariablen (Tabelle E.4-5). Die statistisch relevanten Unterschiede in der kurzfristigen Behaltens- und Gesamtleistung bedeuten (univariate Varianzanalyse; abhängige Variablen: $Behalten_NT_2$, $Gesamt_NT_2$; fester Faktor: „Geschlecht“), dass die Mädchen ohne Notizen einen größeren kurzfristigen Wissenserwerb erzielen als die Jungen ohne Notizen:

$Behalten_NT_2$: $F_{(1,101)} = 9,178$; $p = ,004^{**}$; $\eta^2 = ,150$ ($M_{kN} > J_{kN}$, mittlerer bis großer Effekt),

$Gesamt_NT_2$: $F_{(1,101)} = 3,752$; $p = ,058$ (t); $\eta^2 = ,067$ ($M_{kN} > J_{kN}$, kleiner bis mittlerer Effekt).

Vergleich innerhalb der Mädchengruppe: M_{kN} vs. M_N

Wenn man den Vergleich „Notizen“ vs. „keine Notizen“ innerhalb der Mädchengruppe durchzieht (Tabelle E.3-8), kommt man auf eine kurzfristige hinderliche Wirkung von Notizen in der Transferleistung (univariate Varianzanalyse; abhängige Variable: Transfer_NT₂; fester Faktor: „Notizen“). Vorwissen VT₃ ist in diesem Vergleich keine Kovariate:

Transfer_NT₂: $F_{(1,101)} = 4,180$; $p = ,046^*$; $\eta^2 = ,073$ ($M_{kN} > M_N$, kleiner bis mittlerer Effekt).

Um diesen Effekt erklären zu können, werden die Bearbeitungszeiten untersucht. Andere Kontrollvariablen haben keinen Einfluss (Tabelle E.4-6). Im entsprechenden zweiten Teil des Lernprogramms zeigen sich die folgenden Unterschiede in den Bearbeitungszeiten (Tabelle 9-27): Gesamt- und Lesezeit (beide $p = ,000^{***}$; U-Test), „t₂_Auswählen“ (t-Test, $t = -11,886$; $df = 53$; $p = ,000^{***}$). Sie werden in der weiteren Varianzanalyse (abhängige Variable: Transfer_NT₂, fester Faktor: „Notizen“) als Kovariate berücksichtigt:

Transfer_NT₂ , KoV „t₂_Gesamt“: $F_{(1,101)} < 1,0$; n.s. $M_{kN} = M_N$

Transfer_NT₂ , KoV „t₂_Lesen“: $F_{(1,101)} < 1,0$; n.s. $M_{kN} = M_N$

Transfer_NT₂ , KoV „t₂_Ausw“: $F_{(1,101)} = 4,407$; $p = ,041^*$; $\eta^2 = ,078$ $M_{kN} > M_N$

Hier wird deutlich, dass der Unterschied in der Transferleistung durch die längere Gesamt- und Lesezeit aufgetreten ist. Das Schreiben von Notizen war also lernhinderlich für die Mädchen.

Notizen vs. keine Notizen		t _i _Gesamt	t _i _Hören	t _i _Auswähle n	t _i _Animation	t _i _Lesen
1. Teil (t ₁)	M	,000*** t _N > t _{kN}	,006** t _N < t _{kN}	,000*** t _N > t _{kN}	n.s.	,000*** t _N > t _{kN}
	J (t _N > t _{kN})	,000***	n.s.	,000***	,036*	,000***
2. Teil (t ₂)	M (t _N > t _{kN})	,000***	n.s.	,000***	n.s.	,000***
	J (t _N > t _{kN})	,000***	,011*	,000***	,081 (t)	,000***

Tabelle 9-27: Vergleich der Instruktion „ohne Notizen“ vs. „Notizen“ innerhalb der Mädchen- bzw. Jungengruppe in Bezug auf die Bearbeitungszeit.

Vergleich innerhalb der Jungengruppe: J_{kN} vs. J_N

Notizen wirken sich im Lernen von Jungen wiederum in kurzfristiger Lernleistung förderlich aus (Tabelle E.3-8). Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Varianzanalyse (abhängige Variablen: Behalten_NT_i, Gesamt_NT_i, i = 1, 2, NT₃, Transfer_LT₁ ; fester Faktor: „Notizen“) findet sich in der Tabelle 9-28. Da das Behalten eine Subskala der Gesamtleistung ist, wird der Effekt der Notizen auch in der Gesamtleistung sichtbar: Das Anfertigen von Notizen unterstützt den Wissenserwerb von Jungen in Bezug auf optische Abbildung ($J_N > J_{kN}$, kleine bis mittlere und mittlere bis große Effekte). Dieses Ergebnis bleibt nach der Varianzanalyse mit Kovariate VT₃ auch erhalten (Tabelle 9-28). Für Themen, die hauptsächlich visuell darge-

boten werden („spezieller Wissenstest“, NT₃), ergibt die Methode „Anfertigung von Notizen“ keinen Effekt.

J _N vs. J _{kN}						
Subskalen der Wissenstests	univariate Varianzanalyse			Kovarianzanalyse mit VT ₃		
	F _(1,101)	p	η ²	F _(1,101)	p	η ²
Behalten_NT ₁	6,498	,014*	,126	5,038	,030*	,103
Behalten_NT ₂	9,450	,004**	,174	8,168	,006**	,157
Gesamt_NT ₁	4,964	,031*	,099	3,530	,067 (t)	,074
Gesamt_NT ₂	6,518	,014*	,127	5,133	,028*	,104
NT ₃	4,081	,049*	,083	2,691	n.s.	-
Transfer_LT ₁	3,652	,062 (t)	,075	2,602	n.s.	-

Tabelle 9-28: Ergebnisse der univariaten Varianzanalyse und Varianzanalyse mit der Kovariate VT₃ für den Gruppenvergleich J_N vs. J_{kN}. Es gilt: J_N > J_{kN}.

Im Gruppenvergleich J_N vs. J_{kN} werden zwei Kontrollvariablen zu Kovariaten (Tabelle E.4-6): „Physiknote“ (p = ,016* ; U-Test) und „Selbstwirksamkeitserwartung für das Fach Physik“ (S-Skala, t-Test, t = -2,109 ; df = 45 ; p = ,041*). Ihr Einfluss auf die Leistungsunterschiede wird mit der Kovarianzanalyse untersucht (abhängige Variablen: Behalten_NT_i, Gesamt_NT₂ ; fester Faktor: „Notizen“ ; Kovariaten: VT₃ , „Physiknote“ , „S-Skala“). Die Ergebnisse sind in der Tabelle 9-29 zusammengefasst.

Die höhere Selbstwirksamkeitserwartung von Jungen in der Notizengruppe wirkt sich positiv auf ihr Lernen aus. Diese Kovariate ist jedoch nicht entscheidend. Eine viel stärkere Wirkung hat die Schulleistung im Fach Physik. Dies gleicht den Effekt in Behalten_NT₁ aus. Der signifikante Unterschied bleibt aber in Behalten_NT₂ erhalten, was sich in der Gesamtleistung Gesamt_NT₂ als Tendenz zeigt. Für den zweiten Teil des Lernprogramms gilt: Die Anfertigung von Notizen unterstützt kurzfristig die Behaltensleistung von Jungen (J_N > J_{kN} , mittlerer bis großer Effekt).

Subskalen des Wissenstests (J _N vs. J _{kN})	KoV „Physiknote“		KoV „S-Skala“	
	F _(1,101)	p (η ²)	F _(1,101)	p (η ²)
Behalten_NT ₁	2,710	n.s.	3,690	,061 (,079)
Behalten_NT ₂	5,872	,020* (,120)	7,935	,007** (,156)
Gesamt_NT ₂	3,052	,088 (,066)	4,874	,033* (,102)

Tabelle 9-29: Ergebnisse der Kovarianzanalyse für den Gruppenvergleich J_N vs. J_{kN}. Als erste Kovariate wurde in die Analyse das Vorwissen einbezogen, erst dann jeweils die Kovariaten „Physiknote“ und „S-Skala“.

Zur weiteren Aufdeckung der Effekte wird die Gesamtzeit des zweiten Teils des Lernprogramms herangezogen. Die Jungen mit Notizen haben mehr Zeit mit dem Lernen als Jungen ohne Notizen verbracht (Tabelle 9-27). Diese Gesamtzeit und das, vorhin erwähnte Vorwissen werden als Kovariate in der Varianzanalyse berücksichtigt (abhängige Variablen: Behalten_NT₂, Gesamt_NT₂; fester Faktor: „Notizen“; Kovariaten: VT₃, t₂_Gesamt):

Behalten_NT₂, KoV „t₂_Gesamt“: $F=1,598$; n.s. $J_{kN} = J_N$

Gesamt_NT₂, KoV „t₂_Gesamt“: $F_{(1,101)} < 1,0$; n.s. $J_{kN} = J_N$.

Die bessere Behaltensleistung in der Notizengruppe J_N wird also durch die verlängerte Bearbeitungszeit erreicht.

9.7.2 Räumliches Vorstellungsvermögen

Zum Einfluss des räumlichen Vorstellungsvermögens auf das Anfertigen von Notizen liegen zwar keine ausformulierten Hypothesen vor, trotzdem soll aus Gründen der Vollständigkeit auf die Unterschiede dieser Art eingegangen werden.

In der Schülergruppe mit hohen räumlichen Vorstellungsvermögen (RV+) zeigt sich eine förderliche Wirkung von Notizen (Tabelle E.3-12): $(RV_{N+}) > (RV_{kN+})$. Zur Analyse der numerischen Ergebnisse werden einerseits die univariate Varianzanalyse (abhängige Variablen: normalverteilte Subskalen der Wissenstests; fester Faktor: „Notizen“), andererseits der U-Test herangezogen. Da sich die Gruppen (RV_{N+}) und (RV_{kN+}) im Vorwissen VT₃ nicht unterscheiden ($F = 2,249$; n.s.), wird für das Lernermerkmal RV keine Kovarianzanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 9-30 dargelegt. Es zeigen sich dabei zwei signifikante Unterschiede mit einer mittleren Effektstärke in der kurzfristigen Gesamtlernleistung der Wissenstests T₁ und T₃. Ein mittlerer Effekt tritt auch in den Fällen auf, wo der Unterschied nur in der Tendenz vorhanden ist. Es gilt: $(RV_{N+}) > (RV_{kN+})$.

Der Gruppenvergleich (RV_{N-}) vs. (RV_{kN-}) ergibt keine relevanten Unterschiede in den Subskalen des Wissenstests (Tabelle E.3-12): $(RV_{N-}) = (RV_{kN-})$.

Wenn man die Schüler ohne Notizen (Gruppe kN) in der Ausprägung des räumlichen Vorstellungsvermögens vergleicht $((RV_{kN+})$ vs. (RV_{kN-}) , Tabelle E.3-13), wird die Überlegenheit der angeborenen Fähigkeiten im Wissenstest T₁ deutlich. Für die Lernleistung gilt hier: Schüler mit hohen RV schneiden besser ab als ihre Mitschüler mit niedrigen RV: $(RV_{kN+}) > (RV_{kN-})$. Der Ausmaß von räumlichen Vorstellungsvermögen ist genauso bestimmend bei den Schüler, die mit den Notizen gearbeitet haben: $(RV_{N+}) > (RV_{N-})$. Die Untersuchungsgruppen sind in ihrem Vorwissen VT₃ gleich, weshalb für dieses Merkmal keine Varianzanalyse mit Kovariate durchgeführt wird. Auf eine genaue Darstellung der Ergebnisse soll verzichtet werden, da zu diesem Bereich keine Hypothesen formuliert sind. Die Unterschiede sind ihrem Signifikanzniveau entsprechend in der Tabelle E.3-13 gekennzeichnet.

(RV _{N+}) vs. (RV _{kN+})			
Subskalen der Wissenstests	F _(1,101)	p	η ²
Behalten_NT ₂	-	,089 (t)	-
Gesamt_NT ₁	4,151	,049*	,103
Transfer_LT ₁	3,743	,061 (t)	,094
Gesamt_LT ₁	4,036	,052 (t)	,101
NT ₃	4,242	,047*	,105

Tabelle 9-30: Ergebnisse der univariaten Varianzanalyse und des U-Tests für den Gruppenvergleich (RV_{N+}) vs. (RV_{kN+}). Es gilt: (RV_{N+}) > (RV_{kN+}).

9.7.3 Sprachliche Fähigkeiten

Wenn man die Wirkung der Intervention „Notizen“ innerhalb der Schülergruppe mit hohen sprachlichen Fähigkeiten vergleicht (SF+, Tabelle E.3-17), erhält man mit der univariaten Varianzanalyse lediglich eine Tendenz in einer kurzfristigen Gesamtleistung (abhängige Variablen: Gesamt_NT₁, fester Faktor: „Notizen“, $F(1,101) = 3,145$; $p = ,082$ (t) ; $\eta^2 = ,057$). Dieser kleinere bis mittlere Effekt spricht für die förderliche Wirkung von Notizen für das Lernen von Schüler mit hohen sprachlichen Fähigkeiten: (SF_{N+}) > (SF_{kN+}).

In der Schülergruppe mit niedrigen sprachlichen Fähigkeiten hat sich eine unterstützende Wirkung von Notizen in der langfristigen Lernleistung gezeigt ((SF_{N-}) > (SF_{kN-}), mittlerer Effekt, siehe auch Tabelle E.3-17). Damit kann *Hypothese 6.2* bestätigt werden; es ist ein Unterschied zwischen den Treatmentgruppen (SF_{N-}) und (SF_{kN-}) festzustellen: Das Schreiben von Notizen unterstützt Schüler mit niedrigen SF, die dadurch einen höheren Lernerfolg erzielen als Schüler mit niedrigen SF jedoch ohne die Anfertigung von Notizen:

Behalten_NT₂: $p = ,088$ (t) (U-Test),

Transfer_LT₁: $F(1,101) = 4,613$; $p = ,037^*$; $\eta^2 = ,091$ (ANOVA),

Gesamt_LT₁: $F(1,101) = 4,786$; $p = ,034^*$; $\eta^2 = ,094$ (ANOVA).

Im nächsten Schritt werden Vergleiche innerhalb der Treatmentgruppen „Notizen“ und „keine Notizen“ in Hinsicht auf die sprachlichen Fähigkeiten gebildet (Tabelle E.3-18). In der Notizengruppe sind die Schüler mit hohen (SF_{N+}) und niedrigen sprachlichen Fähigkeiten (SF_{N-}) gleich in ihrem Vorwissen (ANOVA, abhängige Variable: VT₃, fester Faktor: „sprachliche Fähigkeiten“, $F(1,101) < 1,0$; n.s.). Die weitere Analyse kann ohne diese mögliche Kovariate durchgeführt werden. Die univariate Varianzanalyse (abhängige Variablen: normalverteilte Subskalen, fester Faktor: „sprachliche Fähigkeiten“) führt zum folgenden Ergebnis: In der Notizengruppe sind die Schüler mit hohen sprachlichen Fähigkeiten nur in zwei Subskalen des Wissenstests ihren „SF niedrig“-Mitschülern überlegen (siehe auch Tabelle E.3-18):

Transfer_NT₁: $F(1,101) = 8,465$; $p = ,006^{**}$; $\eta^2 = ,155$ (SF_{N+}) > (SF_{N-}) , mittlerer bis großer Effekt,

Gesamt_NT₁: $F(1,101) = 8,475$; $p = ,006^{**}$; $\eta^2 = ,156$ (SF_{N+}) > (SF_{N-}) , mittlerer bis großer Effekt.

In der Gruppe ohne Notizen unterscheiden sich die Schüler mit „SF niedrig“ und „SF hoch“ in ihrem Vorwissen (ANOVA, abhängige Variable: VT_3 , fester Faktor: „sprachliche Fähigkeiten“, $F(1,101) = 5,558$; $p = ,022^*$; $\eta^2 = ,097$). Aus diesem Grund werden die Ergebnisse in der Varianzanalyse mit Kovariate VT_3 berechnet (ANOVA, abhängige Variablen: Transfer_LT₁, Gesamt_LT₁, fester Faktor: „sprachliche Fähigkeiten“, Kovariate: VT_3). Subskalen die nicht normalverteilt sind (Behalten_NT_i, Behalten_LT_i, $i = 1, 2$), werden mit dem U-Test untersucht. In der Tabelle 9-31 wird auch ihre Varianzanalyse mit der Kovariate VT_3 dargestellt: Es ist der einzige Weg um einen Eindruck über die Auswirkungen des Vorwissens auch im Fall von nicht normalverteilten Subskalen zu erhalten. Anhand der Ergebnisse gilt für die Gruppe ohne Notizen: Schüler mit hohen sprachlichen Fähigkeiten erreichen langfristig eine bessere Lernleistung als ihre Mitschüler mit niedrigen sprachlichen Fähigkeiten (Tabelle E.3-18, $(SF_{KN+}) > (SF_{KN-})$, kleiner bis mittlerer Effekt und mittlere bis große Effekte).

(SF _{KN+}) vs. (SF _{KN-})				
Subskalen des Wissenstests	U-Test p	Varianzanalyse mit der Kovariate VT_3		
		F _(1,101)	p	η^2
Behalten_NT ₁	,016*	2,834	,098 (t)	,053
Behalten_NT ₂	,084 (t)	1,176	n.s.	-
Behalten_LT ₁	,033*	1,682	n.s.	-
Behalten_LT ₂	,043*	1,461	n.s.	-
Transfer_LT ₁	-	7,429	,009**	,127
Gesamt_LT ₁	-	7,564	,008**	,129

Tabelle 9-31: Ergebnisse des U-Tests und der Varianzanalyse mit der Kovariate VT_3 für den Gruppenvergleich (SF_{KN+}) vs. (SF_{KN-}). Es gilt: $(SF_{KN+}) > (SF_{KN-})$.

10 Zusammenfassung

„Lernprogramme sind und bleiben Medien, die erst im Kontext des Gesamtgeschehens eines von Menschen getragenen Unterrichts ihre Bedeutung erlangen.“ (Stachelscheid, 2002, S.191)

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zur Wirkung von einfachen visuellen Repräsentationen (Bilder, Animationen) und Notizen auf den Wissenserwerb zusammenfassend dargestellt. Die Diskussion und Interpretation der Ergebnisse zeichnet den Forschungsbedarf auf, weiterhin sowohl den Sinn, als auch die Begrenztheit des praktischen Einsatzes.

Bildgestaltung

Aus den fachdidaktischen, lern- und wahrnehmungspsychologischen Faktoren des visuellen Lernens wurden *Prinzipien der Bildgestaltung* abgeleitet (Kapitel 2). Die theoriegeleitet gestalteten Entwürfe der Bilder wurden in einer explorativ validierenden Vorstudie erprobt (Abschnitt 7.5). Anhand der Bildbeschreibungen und Antworten auf die Interviewfragen der Probanden wurden die Bilder optimiert. Da nur eine minimale Optimierung der Bilder erfolgen musste, haben sich die Gestaltungsprinzipien und deren Umsetzung in der Vorstudie der Untersuchung für die Schüler als nützlich und angemessen erwiesen. Die Belastbarkeit dieser Aussage hängt davon ab, wie kritisch die Probanden waren, was im Nachhinein nicht mehr zu rekonstruieren ist. Das Phänomen der sozialen Erwünschtheit könnte an dieser Stelle die Ergebnisse der Interviews verzerren.

Die Blickbewegungsanalyse (Abschnitt 7.6) gibt jedoch weiteren Aufschluss über die Wirksamkeit der Gestaltungsprinzipien: Bildbereiche prägnanter Gestaltung haben, im Vergleich zu nicht prägnanten Bildelementen, eine erhöhte Anzahl an Fixationen erhalten. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass durch die Anwendung der Gestaltungsprinzipien nicht nur eine Blickzuwendung erreicht wurde, sondern, dass die relevanten Bildinhalte zum Gegenstand der Bildauswertung wurden. Die Bilder konnten mittels höchstens zweier Fixationsbereiche verarbeitet werden. Die Leitidee der Einfachheit der Darstellung konnte also erfolgreich umgesetzt werden. Die Rekonstruktion der Blickverläufe zeigt, wie Größenverhältnisse und das Gesetz der Dynamik von links nach rechts tatsächlich den Blickverlauf steuerten. Die Relevanz der genauen Betrachtung von Bildern für die Behaltensleistung konnte auch bestätigt werden. Es ist also gelungen anhand dieser Prinzipien *lernförderliche Bilder* zu gestalten. Die Wirksamkeit der entwickelten Gestaltungsprinzipien ist damit bestätigt.

Animationsgestaltung

Die theoriegeleitet gestalteten, optimierten statischen Bilder wurden im nächsten Schritt der Entwicklung animiert (Abschnitt 7.4.2). Die Animationsgestaltung verlief ebenfalls in zwei Phasen: Nach der theoretischen Vorarbeit und Aufstellung der *Prinzipien der Animationsgestaltung* (Abschnitt 3.3) und deren Umsetzung, folgte die explorative, qualitative Vorstudie.

Diese Vorgehensweise war notwendig, weil die Animationen, im Vergleich zu statischen Bildern weitere Effekte mit sich bringen. Die entsprechenden theoretischen Überlegungen und empirischen Ergebnisse müssen in die Gestaltungsprinzipien mit einbezogen werden.

Das Besondere an den Visualisierungen des Lernprogramms ist, dass die entstandenen minimalistischen Bilder und Animationen das Ergebnis eines zweifachen Optimierungsprozesses sind:

- Ihre Entwicklung verlief theoriegeleitet nach *Prinzipien der Bild- und Animationsgestaltung*, die Vorteile für das Lernen bringen.
- Die resultierenden Visualisierungen wurden empirisch mit explorativen, qualitativen Studien erprobt und für die Altersstufe 13-14 jährige (Achtklässler) validiert.

Akzeptanz der Visualisierungen

Die Ergebnisse zur Akzeptanz des Lernprogramms der Hauptuntersuchung beruhen auf der subjektiven Einschätzung von Probanden (Abschnitt 9.2). Anhand der Äußerungen kann man von einer guten Verständlichkeit des Lernprogramms ausgehen. In Hinsicht auf die Visualisierungen überwiegt eine positive Selbstauskunft der Lernenden: Die Visualisierungen wurden im Allgemeinen mit 72% bzw. 62% positiv bewertet³⁸. Die Probanden erkannten weiterhin die visuellen Darstellungen als *verständnisfördernd* (36% bzw. 22%). Die verwendeten Bilder werden wegen ihrer Einfachheit kaum kritisiert (3% bzw. 2%).

Der Vergleich der Schüleräußerungen der Treatmentgruppen „Bild“ vs. „Animation“ liefert die folgenden Hinweise: Die Visualisierungen im ersten Teil des Lernprogramms werden in der Animationsgruppe positiver (46%) empfunden als in der Bildergruppe (25%). Dies liegt vermutlich an dem Neuheitseffekt der Animationen. Die numerische Interpretation der Daten lässt darauf schließen, dass die Animationen die subjektive Verständlichkeit des Lernprogramms erhöht haben: Die Animationsgruppe hält die Lerntexte für verständlicher, als die Bildergruppe (66% vs. 52% im ersten Teil, 52% vs. 46% im zweiten Teil des Lernprogramms). Das kann daran liegen, dass die dynamische Darstellung eine echte äußere visuelle Hilfestellung für die Probanden war, oder das Gegenteil ist der Fall: Das Lernprogramm wird als leicht eingeschätzt und die dargebotenen Informationen werden nur oberflächlich verarbeitet. Die Antwort auf dieses Dilemma liefern die Ergebnisse des Wissenstests.

Die Bildergruppe glaubt wiederum, für das Verständnis der Inhalte mehr von den Visualisierungen profitiert zu haben als die Animationsgruppe. Es kann daran liegen, dass Animationen im Vergleich zu Bildern für Schüler eher einen unterhaltsamen Charakter besitzen und sie mit den Begriffen „Lernen, Verständnis“ weniger assoziiert werden (Tabelle 9-10).

In Anbetracht anderer Studien, die mit Sieben- und Zehntklässlern durchgeführt wurden, wird die Verständlichkeit des Lernprogramms mit zunehmend höherer Klassenstufe immer positiver eingeschätzt. Die Schüler der 8. Klasse (vorliegende Untersuchung) schätzen die Bilder fast um das Vierfache positiver ein als die jüngeren Schüler der 7. Klasse. Die Bilder des Lernprogramms werden auch positiver bewertet als Bilder im Lernmedium „Schulbuch“.

³⁸ Die Doppelwerte beziehen sich auf den ersten und zweiten Teil des Lernprogramms.

Einfluss der Visualisierungen auf den Lernerfolg

Die messbaren Lerneffekte in allen Treatmentgruppen können einerseits darauf hindeuten, dass der Aufbau von dynamischen mentalen Modellen stattgefunden hat, andererseits dass eine optimale extrinsische kognitive Belastung und sequenzielle Verarbeitung durch die Steuerung der Aufmerksamkeit erreicht wurde.

Die Testwerte für die langfristige Behaltensleistung fallen im ersten Teil des Lernprogramms so aus, wie es die, aus Theorie und Empirie abgeleitete *Hypothese 1* vorgibt: Die Animationsgruppe³⁹ erreicht eine *bessere Behaltensleistung im Langzeittest* als die Gruppe mit statischen Bildern. Die Kovarianzanalyse zeigt, dass die, mit Animationen verbrachte Lernzeit einen Einfluss auf diesen Effekt hat (Abschnitt 9.4). Das Vorwissen als Kovariate verstärkt den positiven Effekt von Animationen. Andere Kontrollvariablen wiederum spielen keine Rolle. Die anhand der Gestaltungsprinzipien entwickelten Animationen konnten also eine unterstützende Wirkung auf das Lernen der Schüler ausüben. Die Gestaltungsprinzipien können deshalb zur Optimierung der Animationen herangezogen werden.

Die Schüler der Animationsgruppe haben im Gegensatz zur Erwartung der *Hypothese 1*, keine bessere Lernleistung im Transfer erzielt als die Schüler der Bildergruppe. Dieses Ergebnis kann auf zweierlei Art interpretiert werden:

- Die entwickelten dynamischen mentalen Modelle tragen *nicht zwangsläufig* zu einer besseren Transferleistung der Lernenden bei. Die Annahme des Abschnittes 3.2 stimmt also nicht.
- Die Probanden der Untersuchung entwickelten anhand der Animationen keine dynamischen mentalen Modelle.

Beide Erklärungsversuche können zutreffen: Die erste Interpretation kann generell gültig sein. Die zweite Interpretation kann für diese Untersuchung gelten. Die Frage ist dabei: Auf welcher kognitiven Verarbeitungsebene (Abschnitt 3.1) haben sich die Schüler nach dem Lernprozess befunden? Die verwendeten Verben, die das Licht in den offenen Antwortformaten des Leistungstests als Prozess beschreiben (z.B. Das Licht breitet sich aus, bewegt sich, kommt in die Kamera, etc.) und die Ergebnisse im speziellen Wissenstest (NT₃, LT₃) sind ein Indiz dafür, dass die Schüler *beider* Treatmentgruppen *dynamische visuelle Vorstellungen* entwickelt haben. Diese Vorstellungen wurden jedoch durch die Animationen (in der Animationsgruppe) über die Zeit stärker eingepägt als durch Bilder (in der Bildergruppe) erzeugte Vorstellungen.

Im zweiten Teil des Lernprogramms zeigt sich kein Unterschied zwischen der Bilder- und Animationsgruppe in der langfristigen Behaltensleistung. Bei diesen Inhalten wäre es also ausreichend gewesen nur statische Bilder einzusetzen. Woran kann das liegen? War es hier indifferent, ob man statische oder dynamische Visualisierungen einsetzt? War die grafische Darstellung der Animationen nicht gut genug? Oder ist der Neuheitseffekt der Animationen „verpufft“?

³⁹ In der Animations- und Bildergruppe sind sowohl Schüler, die Notizen angefertigt haben, als auch Schüler, die ohne Notizen gearbeitet haben.

Wenn man die Items der Behaltensskala und die Darstellungsform ihrer Inhalte betrachtet (Tabelle 10-1), wird ersichtlich, dass der Inhalt der Behaltensskala überwiegend keine Animationen erfordert (Ausnahme ist das Item 4). Als ob man an diesen Stellen des Lernprogramms nur wegen des Designs der Untersuchung (Bild vs. Animation) die dynamische Darstellung dem Lernprogramm aufgezwungen hätte (z.B. zum Vergleich zweier Bilder braucht man keine Überblendung (1a_o, 1b_o)). Damit wird deutlich, wie wichtig die echte dynamische Natur der darzustellenden Phänomene ist. Diese Interpretation untermauert das Gestaltungsprinzip, nur an den Stellen Animationen zu verwenden, wo es inhaltlich Sinn macht, wo die darzustellenden Phänomene über eine echte dynamische Natur verfügen (Abschnitt 3-3).

Items, Behalten, (T ₂)	Antwort- format	Darstellungsform im Lernprogramm		Inhalt des Items
		Bildversion	Animationsversion	
1a_o	o	Foto	Überblendung	Bildqualität bei der Lochkamera
1b_o	o	Foto	Überblendung	
2	Z	statisches Bild		Bikonvexe Linse
4	o	Foto, statisches Bild	Überblendung, Animation mit dünnen Lichtbündel	Sichtbarkeit des Kerzenstumpfs ermöglichen (z.B. Lampe)
7_o	o	Foto		Bildqualität bei der Bikonvexlinse
8_mc	MC	statisches Bild, Foto	Animation mit Translation und Transformation	Veränderungen im Abbild durch die Verschiebung der Mattscheibe

Tabelle 10-1: Darstellungsform der Visualisierungen und die Inhalte des Testitems in der Behaltensskala zum zweiten Teil des Lernprogramms (o - offenes Antwortformat, Z - Zeichnung, MC - Multiple-Choice).

Im dritten Teil des Wissenstests, im „speziellen Wissenstest“ (T₃), konnte kein Lernvorteil der Animationsgruppe festgestellt werden. Die animierte Darstellung der Lichtausbreitung, des physikalischen Sehvorgangs und der Streuung führt zu gleichem Wissenserwerb, wie die statische Visualisierung der Inhalte. *Hypothese 2* konnte nicht bestätigt werden.

Diese Inhalte waren im Text des Lernprogramms nur spärlich beschrieben bzw. hauptsächlich visuell dargeboten. Gerade deshalb kann man davon ausgehen, dass sie teilweise nicht erinnert wurden bzw. zum gleichen Lernergebnis in beiden Treatmentgruppen geführt haben. Visualisierungen brauchen den Text. Bei dem Lerninhalt „optische Abbildung“ (erster Teil des Lernprogramms) besteht nicht nur ein starker Text-Bild-, sondern auch ein starker *Text-Animations-Bezug*, was auch zum erhaltenen Effekt in der langfristigen Behaltensleistung beiträgt.

gen konnte. Der enge *Text-Animations-Bezug* ist also eine wichtige Komponente der Gestaltungskriterien (Redundanz- und Kontiguitätsprinzip, Abschnitt 3.3).

Im Folgenden werden Unterschiede in den Kontrollvariablen zwischen den Treatmentgruppen in Betracht genommen:

Visualisierungen und Geschlecht

Für die Stichprobe der Untersuchung gilt, dass die Jungen ein höheres Vorwissen (VT_3) besitzen als die Mädchen. Die Tests zu ihren kognitiven Fähigkeiten (SF, RV)⁴⁰ zeigen jedoch keine Unterschiede. Dieses Teilergebnis entspricht den gemessenen Leistungsunterschieden und Lernmerkmalen in der TIMS-Studie (Baumert et al., 1997). Wenn man das Vorwissen als Kovariate berücksichtigt, bleibt der Unterschied im Wissenserwerb der zwei Gruppen im Nachtest NT_3 erhalten: Die Jungen lernen zwar mit dem Lernprogramm kurzfristig mehr als die Mädchen, dieser Unterschied ist aber nicht weitreichend, da er in der langfristigen Lernleistung LT_3 nicht mehr nachgewiesen werden kann. Der Leistungsunterschied beruht auf geschlechtsspezifischen Unterschieden im Vorwissen.

Die Leitfrage des folgenden Abschnittes ist, ob eine Visualisationsart geeigneter für ein Geschlecht ist als für ein anderes.

Innerhalb der *Bildergruppe* tritt erneut der typische geschlechtsspezifische Unterschied auf (M_B vs. J_B)⁴¹: Jungen besitzen ein höheres Vorwissen als die Mädchen. Die bessere kurzfristige Behaltensleistung (NT_3) von Jungen ist wahrscheinlich auf diesen Vorteil zurückzuführen: Sie können beim Lernen auf vorhandene Wissensstrukturen zurückgreifen, dies reduziert ihre intrinsische kognitive Belastung beim Erwerb des neuen Wissens (Abschnitt 5.1), was dann zu einem erleichterten und effizienteren Wissenserwerb führt.

Die Mädchen der Bildergruppe haben wiederum eine bessere Deutschnote und schauen sich TV-Sendungen zur Physik öfters an als die Jungen der Bildergruppe. Die bessere Deutschnote entspricht den geschlechtsspezifischen Studien. Da sie aber auf die Lernleistung in der vorliegenden Untersuchung keine Auswirkung hat, wird sie weiter nicht berücksichtigt. Die Häufigkeit der angeschauten TV-Sendungen mit physikalischen Themen dient als Einschätzung des physikalischen (Sach)Interesses der Schüler. Das erhaltene Ergebnis steht im Gegensatz zu anderen Forschungsergebnissen, wo Mädchen sich im Allgemeinen weniger für Physik interessieren als Jungen (Abschnitt 8.3.1). Die Mädchen der Stichprobe jedoch schauen sich tendenziell öfters TV-Sendungen mit physikalischen Themen an als die Jungen. Daraus kann man auf ihr, gegenüber Jungen, höheres physikalisches (Sach-)Interesse folgern. Für die meisten Mädchen der Stichprobe ist Physik gleichzeitig das unbeliebteste Schulfach (Tabelle E.1-2). Diese Kluft zwischen Sachinteresse und Fachinteresse ist nicht überraschend. Zwischen beiden fand die IPN-Interessenstudie nur einen geringen Zusammenhang (Hoffmann et al., 1998).

Die höhere Häufigkeit der gesehenen TV-Sendungen hat für das Lernen der Mädchen der Bildergruppe im Vergleich zu den Jungen der Bildergruppe, einen entscheidenden Einfluss: Aus

40 SF - sprachliche Fähigkeiten, RV - räumliches Vorstellungsvermögen.

41 M_B , J_B - Mädchen bzw. Jungen, die mit der Bildversion des Lernprogramms gelernt haben.

ihr folgt deren bessere Behaltensleistung (NT_2). Dies deutet auf einen Zusammenhang zwischen Sachinteresse und Lernbereitschaft hin. Eine weitere Kovariate, die für die bessere kurzfristige Behaltensleistung (NT_2) der Mädchen mitverantwortlich ist, ist ihre höhere Lesezeit im Lernprogramm. Die Tatsache, dass die Mädchen längere Zeit auf den Textseiten des Lernprogramms als die Jungen verbringen, steht im Einklang mit ihrem höheren physikalischen Interesse. Die höhere Lesezeit der Mädchen kann sich außerdem daraus ergeben, dass die Mädchen sorgfältiger arbeiten als die Jungen. Die Variable „Sorgfalt“ war aber nicht kontrolliert, deshalb sei diese Aussage nur als eine mögliche Erklärung hier genannt.

Da die erhaltenen Unterschiede in der Lernleistung auf bestimmte Einflussfaktoren zurückzuführen sind, ist die Wechselwirkung zwischen der Visualisierungsart „Bild“ und „Geschlecht“ nicht bedeutsam: *Mädchen und Jungen lernen gleich gut mit den Bildern des Lernprogramms.*

Eine Frage bleibt jedoch: Wieso erlangen die Jungen im Vorfeld des Unterrichts ein höheres Vorwissen, wenn die Häufigkeit der TV-Sendungen und das damit verbundene physikalische Interesse darüber keine Auskunft gibt? Vielleicht lesen sie mehr Bücher über die Physik, recherchieren im Internet oder reden darüber öfters mit ihren Klassenkameraden? Sie könnten auch mehr Erfahrung im Umgang mit physikalisch-technischen Gegenständen und Phänomenen in ihrem Elternhaus erworben haben. Diese Einflussfaktoren könnten in einer weiterführenden Untersuchung mit einem Fragebogen kontrolliert werden. Das Ergebnis wirft damit eine methodische Frage auf: Ist die Häufigkeit der geschauten TV-Sendungen etwa kein gültiges Maß für das Interesse an Physik?

In der *Mädchengruppe* (M_A vs. M_B)⁴² wird eine langfristige positive Wirkung von Animationen auf die Behaltensleistung (LT_1) gemessen. Das höhere physikalische Interesse der Mädchen der Bildergruppe kann den Effekt der Animationen nicht ausgleichen: *Mädchen der Animationsgruppe behalten langfristig mehr Wissen als Mädchen der Bildergruppe.* Der erhaltene Effekt ist eindeutig auf die mit Animationen verbrachte Zeit zurückzuführen.

Ein genereller Lernvorteil für die Animationen des Lernprogramms konnte hier ebenfalls nicht gezeigt werden: Jungen der Animationsgruppe schneiden gleich gut ab wie Jungen der Bildergruppe und erzielen den gleichen Wissensstand wie Mädchen der Animationsgruppe. Den geringsten Wissenserwerb haben Mädchen erreicht, die mit der Bildversion des Lernprogramms gelernt haben. *Animationen sind also für die Mädchen eine geeignetere Visualisierungsart als Bilder.* Sie erreichen dadurch die gleiche langfristige Behaltensleistung wie Jungen mit Animationen bzw. Bilder. In der physikdidaktischen Forschung existieren zur Wirkung von Animationen in Bezug auf Geschlecht noch keine Untersuchungen. Der erhaltene Geschlechtsunterschied steht im Einklang mit einem Forschungsergebnis der Chemiedidaktik (Barnea & Dori, 1999): Hier erzielten Mädchen mit dreidimensionalen Animationen ein besseres Verständnis für die Struktur der Moleküle, als Mädchen der Kontrollgruppe, die mit Bildern gelernt haben.

42 M_A - Mädchen, die mit der Animationsversion des Lernprogramms gelernt haben.

Der Effekt ist pädagogisch relevant, deshalb lohnt es sich über die Ursachen nachzudenken: Da sich die Treatmentgruppen (M_A , M_B) in ihrem räumlichen Vorstellungsvermögen, fachspezifischem Selbstkonzept und Selbstwirksamkeitserwartung nicht unterscheiden (Tabelle E.4-2, 3) und weiterhin die Wirkung der Kovariate „Sachinteresse“ aufgeklärt werden konnte, ist eine zutreffende lernpsychologische Erklärung zu dem erhaltenen Ergebnis nicht gegeben (Wodzinski, 2007, S.561f). Es gibt zwei Möglichkeiten: Entweder liegt dem Ergebnis ($M_A > M_B$) ein Messfehler zu Grunde, oder wir akzeptieren das Ergebnis, dann müssen wir aber nach Gründen suchen. Wenn das Ergebnis stimmig ist, dann kann eine neurobiologische Erkenntnis eine, wenn auch spektakuläre Erklärung liefern: Hormonelle Schwankungen während des weiblichen Monatszyklus erzeugen Veränderungen von kognitiven Leistungen (Güntürkün et al., 2007, S.5f). Dieser Befund ist im Einklang mit den Ergebnissen der Lernpsychologie, weil bei den Leistungsunterschieden der Mädchen kein Muster erkennbar ist. Da die Variable „Menstruationszyklus“ in der Untersuchung nicht kontrolliert war, bleibt dieser Erklärungsversuch erst einmal eine Spekulation. Er könnte aber Ausgangspunkt für weitere Studien sein, den Einfluss hormoneller Schwankungen des Körpers auf das Lernen mit Bildern und Animationen zu untersuchen.

Visualisierungen und räumliches Vorstellungsvermögen

Schüler mit hohem räumlichen Vorstellungsvermögen ($RV+$) erreichen in der Untersuchung eine bessere Lernleistung als Schüler mit niedrigem ($RV-$) (Abschnitt 9.5.2, $(RV+) > (RV-)$). Die Untersuchungsgruppen waren zwar im Vorwissen gleich, dieser Unterschied tritt jedoch durchgängig, in allen Teilen des Wissenstests auf. Das Ergebnis ist also auf die abweichenden kognitiven Fähigkeiten zurückzuführen.

Der Lernvorteil der Schüler mit hohem räumlichen Vorstellungsvermögen bleibt innerhalb der *Bildergruppe* auch in allen Teilen des Wissenstests erhalten ($(RV_B+) > (RV_B-)$). Das spannende ist, dass dieser Unterschied in der Lernleistung der *Animationsgruppe* ($(RV_A+) > (RV_A-)$) nicht mehr konsistent auftritt: Im Wissenstest zum zweiten Teil des Lernprogramms (T_2) und im „speziellen Wissenstest“ (T_3) sind keine signifikanten Unterschiede mehr zu messen.

Vergleichende Analysen hinsichtlich der visuellen Gestaltung innerhalb der Schülergruppe mit niedrigem räumlichen Vorstellungsvermögen zeigen, dass Schüler der *Animationsgruppe* einen größeren Wissenserwerb als Schüler der *Bildergruppe* erreichen ($(RV_A-) > (RV_B-)$). Dieser Effekt zeigt sich in der langfristigen Gesamt- und Behaltensleistung des ersten Teils des Lernprogramms (LT_1) und in allen Skalen der kurzfristigen Lernleistung beim zweiten Teil des Lernprogramms (NT_2). Die Animationen können also in beiden Teilen des Lernprogramms die durch verschiedene kognitive Fähigkeiten verursachten Unterschiede in der Lernleistung ausgleichen. Es findet sich damit ein empirischer Hinweis auf die *kompensatorische Wirkung der Animationen*. Dies steht im Einklang mit der Supplantationstheorie von Salomon, wonach eine fehlende Fähigkeit des Lernenden durch die Vorführung eines dynamischen Prozesses ersetzt wird (Abschnitt 5.2). Dies gelang zwar nicht für alle Teile des Wissenstests, aber die mittleren bis großen Effekte weisen auf eine hohe Nützlichkeit hin.

Ein erhöhtes Maß räumlichen Vorstellungsvermögens (RV+) kann wiederum Nachteile einer weniger geeigneten Visualisierungsform (in diesem Fall Standbilder) ausgleichen: Bei den Schülern mit hohem RV konnten keine Unterschiede in der Lernleistung zwischen den Gruppen „Bild“ und „Animation“ festgestellt werden ($(RV_A +) = (RV_B +)$). Die erhaltenen Ergebnisse entsprechen sowohl der Metaanalyse von Höffler zur Wirkung von Animationen im Lernprozess (2007, S.138f), als auch Studien in der Chemiedidaktik (z.B. Barke & Sopandi, 2006).

Visualisierungen und sprachliche Fähigkeiten

Schüler mit hohen sprachlichen Fähigkeiten erreichen in den meisten Subskalen des Wissenstests eine bessere Lernleistung als Schüler mit niedrigen sprachlichen Fähigkeiten ($(SF+) > (SF-)$). Der Effekt ist jedoch schwächer als beim räumlichen Vorstellungsvermögen. Der Unterschied zeigt sich auch innerhalb der Bilder- und Animationsgruppe ($(SF_B +) > (SF_B -)$, $(SF_A +) > (SF_A -)$). Eine kompensierende Auswirkung der Animationen konnte nicht festgestellt werden. Der Wissenserwerb der Schüler mit niedrigen bzw. hohen sprachlichen Fähigkeiten wird also durch die unterschiedliche Visualisierung des Lernprogramms nicht beeinflusst: $(SF_B +) = (SF_A +)$, $(SF_B -) = (SF_A -)$.

Fazit: Visualisierungen

Anhand der entwickelten *Prinzipien der Bildgestaltung* konnten lernförderliche Bilder gezeichnet werden. Es spricht nichts dagegen, diese Prinzipien auch für andere Bilder, die beim Physiklernen Verwendung finden, als gültig anzunehmen. Die Gestaltung von Bildern lässt sich jedoch nicht operationalisieren: Das Nachdenken und die schöpferische Auseinandersetzung des Bildautors mit dem Thema kann Keinem erspart werden.

Die positive Wirkung von Animationen auf den Lernerfolg konnte teilweise bestätigt werden. Im ersten Teil des Lernprogramms erreicht die Animationsgruppe eine *nachhaltig bessere Behaltensleistung* als die Gruppe mit statischen Bildern. Anhand dieses Ergebnisses lässt sich interpretieren, dass die Schüler der Animationsgruppe bessere „dynamische mentale Modelle“ entwickelten. Diese Deutung ist dabei mit der nötigen Vorsicht als empirisch gestützte Hypothese zu nehmen. Im zweiten Teil des Lernprogramms zeigt sich wiederum kein Unterschied zwischen den Treatmentgruppen, weil die *Inhalte* der Behaltensskala keine dynamischen Visualisierungen erfordern. Im dritten Teil des Wissenstests wird wiederum deutlich, wie wichtig ein enger *Text-Animations-Bezug* für das Lernen mit Animationen ist: Eine Animation kann ohne sprachliche Beschreibung ihre positive Wirkung nicht entfalten.

Mit diesen Ergebnissen unterstreicht die Arbeit den bewussten, umsichtigen Einsatz der Animationen. Der erhaltene kleine bis mittlere Effekt in der langfristigen Behaltensleistung kann im komplexen Geschehen des Lernens als wertvoll erachtet werden. Die Bedenken, ob zu einem Lerninhalt überhaupt Animationen präsentiert werden sollten, haben aber auch ihre Berechtigung. Die uneinheitlichen Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Animationen im Vergleich zu Bildern keine generelle lernförderliche Wirkung haben. Wenn man jedoch nur Inhalte dynamischer Natur zum Gegenstand der Visualisierung wählt, theoriegeleitet vorgeht,

d.h. nach lern- und wahrnehmungspsychologischen Prinzipien die Grafik entwickelt, einen engen Text-Animations-Bezug herstellt und sie mit Hilfe von Interviews validiert, dann ist eine positive Wirkung von Animationen auf die nachhaltige Behaltensleistung zu erwarten. Die entwickelten *Prinzipien der Animationsgestaltung* können also zur Optimierung der Animationen herangezogen werden.

In der vorliegenden Untersuchung hat sich das Vorwissen erneut als wichtige Einflussgröße auf den Lernerfolg herausgestellt. Die erhaltenen Ergebnisse liefern ein weiteres empirisches Argument für die These, dass das unterschiedliche Vorwissen auch für die Unterschiede im Lernen von Jungen und Mädchen ein wichtiger Faktor ist (Wodzinski, 2007, S.561).

Mädchen und Jungen lernen generell gleich gut mit den Bildern des Lernprogramms. Unterschiede in ihrem Lernerfolg entstehen aus verschiedenen Kontrollvariablen: Der Lernvorteil der Jungen in der kurzfristigen Behaltensleistung NT_3 stammt aus ihrem höheren Vorwissen. Der Lernvorteil der Mädchen in der kurzfristigen Behaltensleistung NT_2 ist auf ihr höheres Sachinteresse, ihre höhere Lesezeit, und auf die damit vermutlich verbundene höhere Lernbereitschaft zurückzuführen. Da es sich in beiden Fällen um einen mittleren Effekt handelt, ist die Prägung der Geschlechtsrollen im Lernprozess bedeutend.

Passend zum Gesamtbild der Untersuchung erzielen die Mädchen mit Animationen im ersten Teil des Lernprogramms eine nachhaltig bessere Behaltensleistung als die Mädchen der Bildergruppe. Die in der pädagogischen Praxis ungewöhnliche Größenordnung des Effekts (mittel bis groß) zeigt die Wichtigkeit des Animationseinsatzes für den Lernerfolg der Mädchen.

Da das *räumliche Vorstellungsvermögen* (RV) ein Primärfaktor der Intelligenz ist und eine wichtige Rolle beim visuellen Lernen spielt (Abschnitt 5.2), ist die Überlegenheit der Schüler mit hohem RV im Vergleich zu Schülern mit niedrigem RV kein überraschendes Ergebnis. Diese Kluft konnte aber in der Studie durch Einsatz von Animationen reduziert werden. Animationen können also Mängel im räumlichen Vorstellungsvermögen ausgleichen, vermutlich mittels Bereitstellung eines dynamischen mentalen Modells (Abschnitt 3.2). Schüler mit niedrigem RV scheinen überfordert zu sein und benötigen das durch Animationen bereitgestellte bewegte Modell als Vorlage für ihr mentales Modell.

Anhand der Effektstärken gilt, dass das räumliche Vorstellungsvermögen ein stärkerer Einflussfaktor als die *sprachlichen Fähigkeiten* ist. Es zeigt sich ansonsten die gleiche fördernde Wirkung der sprachlichen Fähigkeiten: Schüler mit hohen sprachlichen Fähigkeiten erreichen eine bessere Lernleistung als Schüler mit niedrigen sprachlichen Fähigkeiten. Eine kompensierende Auswirkung der Animationen konnte jedoch nicht festgestellt werden. Sprachliche Fähigkeiten bleiben anhand dieser Ergebnisse für das visuelle Lernen weiterhin ein unbedeutender Faktor.

Einfluss der Notizen auf den Lernerfolg

Die Notizengruppe erreicht kurzfristig eine bessere Behaltensleistung zu beiden Teilen des Lernprogramms als die Gruppe ohne Notizen. Die Notizengruppe erzielt jedoch eine bessere Schulleistung in der Physik und verfügt gleichzeitig über eine höhere Selbstwirksamkeitser-

wartung als die Gruppe ohne Notizen. Der erhaltene Unterschied ist auf diese zwei Kovariaten zurückzuführen, wobei der stärkere Einflussfaktor die "Physiknote" ist. Das Positive an diesem Ergebnis ist, dass die Schüler durch ihre Schulleistung nicht vollständig determiniert sind: Die "Physiknote" und „Selbstwirksamkeitserwartung“ hat nur eine kurzfristige positive Wirkung auf ihr Lernen. Weiterhin wurde der positive Effekt von Notizen durch die verlängerte Bearbeitungszeit verursacht.

Notizen und Geschlecht

Die Vergleiche bezüglich des Geschlechts führen zu folgenden differenzierteren Sichtweisen:

Jungen, die Notizen angefertigt haben (J_N), erzielen einen größeren kurzfristigen Lernerfolg als Mädchen mit Notizen ($J_N > M_N$). Die Mädchen ohne Notizen (M_{kN}) erzielen wiederum einen größeren kurzfristigen Wissenserwerb als die Jungen ohne Notizen ($M_{kN} > J_{kN}$). Diese Effekte kann man damit erklären, dass die Mädchen auch ohne Anfertigung von Notizen mehr Aufmerksamkeit dem Lernprogramm widmen als die Jungen ohne Notizen. Es gibt sogar Hinweise, dass die Anfertigung von Notizen und die damit einhergehende längere Bearbeitungszeit lernhinderlich für die Mädchen wirkt ($M_{kN} > M_N$). Im Rahmen der *Cognitive-Load-Theorie* lässt sich der Effekt durch die kognitive Überlastung von Mädchen interpretieren: Sie haben nicht ausreichend kognitive Kapazität in das Verstehen des Lernstoffs investiert, sondern waren mit dem möglichst guten (Ab)Schreiben von Texten beschäftigt (unter Annahme, dass sie die Aufgabe „Notieren“ möglichst gut erfüllen wollten). Das Schreiben von Notizen war insofern eine Ablenkung für die Mädchen.

Die Jungen werden wiederum durch Anfertigen von Notizen dazu gebracht, dass sie sich mehr mit den Inhalten des Lernprogramms auseinandersetzen. Die positive Wirkung des Treatments spiegelt sich dann in ihren kurzfristigen Behaltens- und Gesamtleistungen für beide Teile des Lernprogramms wieder: Jungen mit Notizen schneiden besser ab, als Jungen ohne Notizen ($J_N > J_{kN}$). Da der erhaltene Effekt bedeutsam (mittel bis groß) ist, ist der Einsatz von Notizen bei den Jungen in der Unterrichtspraxis zu erwägen.

Notizen und kognitive Fähigkeiten

Die erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass die Anfertigung von Notizen bestehende Unterschiede in *räumlichen Vorstellungsvermögen* nicht ausgleichen kann. Das Notieren (genauer gesagt die verlängerte Bearbeitungszeit) bringt jedoch für die Schüler mit hohen räumlichen Vorstellungsvermögen Vorteile: Schüler mit RV+ und Notizen schneiden in der kurzfristigen Gesamtleistung besser ab als Schüler mit RV+ und ohne Notizen. Tendenzen sind sogar in einigen Subskalen der langfristigen Lernleistung zu finden.

Das Schreiben von Notizen unterstützt Schüler mit niedrigen *sprachlichen Fähigkeiten*, die dadurch eine höhere langfristige Lernleistung erzielen als Schüler mit (SF –) jedoch ohne die Anfertigung von Notizen. Schüler mit hohen sprachlichen Fähigkeiten schneiden sowohl in der Notizengruppe, als auch in der Gruppe ohne Notizen besser ab als ihre Mitschüler mit niedrigen sprachlichen Fähigkeiten. Diese Überlegenheit zeigt sich jedoch nur in zwei Subskalen des Wissenstests. Da der Effekt nicht durchgängig auftritt, sind an dieser Stelle weiterführende Untersuchungen nötig.

Fazit: Notizen

In der Untersuchung ist zwar keine generelle lernförderliche Wirkung von Notizen zu messen, für die folgenden Schülergruppen hat jedoch der Einsatz von Notizen Lernvorteile gebracht: Jungen, Schüler mit hohen räumlichen Vorstellungsvermögen und Schüler mit niedrigen sprachlichen Fähigkeiten. Da die lernförderliche Wirkung nur für bestimmte Subskalen und Schülergruppen von Gültigkeit ist, gilt die *Hypothese 3* lediglich als partiell belegt. Das Anfertigen von Notizen ist also als ergänzende Methode anzusehen, wodurch die Beschäftigung mit dem Lerninhalt verlängert werden kann und dadurch die kurzfristige Behaltensleistung, in manchen Fällen sogar auch die langfristige Lernleistung verbessert werden kann.

Methodenkritische Anmerkungen

Die Untersuchung ist insgesamt so verlaufen, wie sie aufgrund der theoretischen und organisatorischen Vorüberlegungen geplant war. Die Überflüssigkeit einiger Bilder bzw. Bildelemente konnte allerdings erst mit Hilfe der *Blickbewegungsanalyse* entdeckt werden. In den Interviews haben die Probanden diese Bildelemente zwar nicht als störend wahrgenommen, sie könnten jedoch deren Arbeitsgedächtnis zusätzlich belasten. Deshalb würde man auf ihre Darstellung in einer verbesserten Version des Lernprogramms verzichten. Die Blickbewegungsanalyse sollte weiterhin sowohl bei der Animationsversion des Lernprogramms, als auch im zweiten Teil des Lernprogramms eingesetzt werden.

Für die Datenauswertung stehen zwar insgesamt weniger Datensätze zur Verfügung als ursprünglich beabsichtigt (102 anstatt 120), dies kann jedoch für die statistische Analyse als unproblematisch gewertet werden, da zum einem großzügig geplant wurde und zum anderen keine systematischen Ausfälle zu beobachten sind.

Die Probanden der Untersuchung können als repräsentativ für Schüler der 8. Klasse in Brandenburg angesehen werden: Sie zeigen keine Besonderheiten hinsichtlich ihrer kognitiven Fähigkeiten, Beliebtheit der Schulfächer, Noten und Vorwissen. Die Mädchen und Jungen dieser Stichprobe haben jedoch im Fach Physik das gleiche Selbstkonzept und die gleiche Selbstwirksamkeitserwartung, was generell untypisch ist.

Die eingesetzten Untersuchungsinstrumente haben sich insgesamt als inhaltlich angemessen und praktikabel erwiesen. Um die Reliabilität der Skalen zu gewährleisten, müssten einige Items ausgelassen werden, die Skalen blieben jedoch inhaltlich valide. Die Vielfalt der eingesetzten statistischen Verfahren gewährleistet, dass die Ergebnisse auf verschiedene Weise in den Daten gefunden und dadurch abgesichert werden können. Zur Absicherung wurde auch mit der "minimalen" und "maximalen" Stichprobe gerechnet ($n=63, 121$): Die erhaltenen Effekte blieben weiterhin stabil.

Im ursprünglichen Forschungsvorhaben war keine Differenzierung nach Geschlecht vorgesehen. Die, zuerst zufällig gefundenen Unterschiede im Wissenserwerb haben jedoch vertiefende Analysen veranlasst, die unerhoffte Effekte zu Tage treten ließen. Dies war auch möglich, weil in den Untersuchungsgruppen (Bild, Animation, Notizen, keine Notizen) eine statistisch vergleichbare Anzahl an Jungen und Mädchen anwesend war.

Die Ergebnisse zeigen (Anhang E.3), dass ein Wissenserwerb in der gesamten Stichprobe ebenso wie innerhalb aller Untersuchungsgruppen stattgefunden hat. Dies kann bei der Kürze des Treatments als ein Erfolg gewertet werden, insbesondere, da nachhaltige Veränderungen auftraten. Sechs Wochen sind in schulischen Dimensionen ein langer Zeitraum, in dem die Schüler keinen weiteren Unterricht zum Inhaltsgebiet erhielten.

Eine inhaltliche Analyse der Notizenblätter bzw. vertiefende Analyse der Logfiles könnte noch weitere Aufschlüsse über den Wissenserwerb mit einfachen Visualisierungen und Notizen liefern. Sie könnten Teil von weiterführenden Analysen werden.

Ausblick: Folgerungen für Praxis und Forschung

Aus den Ergebnissen folgt, dass sich die entwickelten Gestaltungsprinzipien dafür eignen, lernförderliche Bilder und Animationen zu gestalten. Damit ist es gelungen auch ein wissenschaftlich begründetes Urteil über die Qualität der Visualisierungen zu entwickeln (siehe Kriterienkatalog in Berger & Staraschek, 2009). Die vorliegende Arbeit liefert somit wertvolle Hinweise für Schulbuchverlage, Internetportale und Entwicklung von Lernprogrammen sowie für die Unterrichtspraxis der Lehrer (z.B. Tafelskizzen, Hand-out-Material). In dem sie differenzierte Hinweise zum *bewussten Einsatz* von Bildern und Animationen in Lernmedien liefert, ist die Arbeit nicht nur ihrer übergeordneter Zielsetzung gerecht geworden, sondern enthält gleichzeitig einen verallgemeinerbaren aus dem fachdidaktischen Rahmen hinaus zeigenden Gewinn.

Wir sind uns jedoch wohl bewusst, dass jede Zeichnung in der Unterrichtspraxis Aufwand bedeutet. Mit einer vermutlich durchschnittlich zwanzigminütigen Vorbereitungszeit für eine Schulstunde (Haas, 1998) konkurriert die Forderung „lernförderliche Bilder“ herzustellen, hart mit anderen Notwendigkeiten der Unterrichtsvorbereitung. Diese Arbeit will trotzdem das Bewusstsein dafür schärfen, dass für Lernende an solchen Stellen Verzögerungen oder Schwierigkeiten auftreten können. Dieses Wissen kann im Unterricht berücksichtigt werden.

Das entwickelte Lernprogramm kann in der Schulpraxis als ein multimedialer Einstieg in die Optik genutzt werden, was ganz konkret die Unterrichtsvorbereitung erleichtert. Seine Bearbeitungsdauer von 15 bzw. 10 Minuten (erste bzw. zweite Teil) ohne Anfertigung von Notizen macht seinen Einsatz in einer Schulstunde einfach. Es bleibt auch genügend Zeit für inhaltliche Diskussionen, Experimente oder das Lösen von Aufgaben. Der Wissenszuwachs im speziellen Wissenstest untermauert die Lerntauglichkeit des Lernprogramms.

Aus der nachhaltig besseren Behaltensleistung der Animationsgruppe folgt, dass sich der Einsatz von Animationen in Lernmedien lohnt. Bei der professionellen Entwicklung von Lernprogrammen empfiehlt sich, die Blickbewegungsanalyse für die Optimierung der Visualisierungen zu verwenden. Falls die Programmierung von Animationen zu kostenintensiv ist, können diese mit einer Sequenz statischer Schlüsselbilder ersetzt werden. Hier sollen aber die Grafiker anhand der entwickelten „Prinzipien der Bildgestaltung“ vorgehen.

Die vorliegende Arbeit steckt auch den Sinn und das Einsatzgebiet von Notizen genauer ab. Dementsprechend ist ihr Einsatz nur bei Jungen, Schüler mit hohen räumlichen Vorstellungs-

vermögen und Schüler mit niedrigen sprachlichen Fähigkeiten zu empfehlen. Gegebenenfalls ist von ihrem Einsatz auch ganz abzuraten, weil ihre Anfertigung auf das Lernen von Mädchen hinderlich wirken kann.

Die erhaltenen Ergebnisse und die, im Laufe der Arbeit geleistete gedankliche Auseinandersetzung mit dem Thema eröffnen mehrere Richtungen, die in weiterführenden Untersuchungen eingeschlagen werden können. Die genaueren Arbeitshypothesen könnten aus den folgenden Ergebnissen, Beobachtungen und Ideen generiert werden:

- Konkrete Gestaltungskriterien, wie zum Beispiel, zu einem Zeitpunkt darf nur eine Veränderung in der Animation stattfinden, könnten auf ihre Lernwirksamkeit untersucht werden.
- Auf der Trend-Ebene konnte mit einem kleinen bis mittleren Effekt gezeigt werden, dass Animationen in Verbindung mit Notizen mit zusätzlichen Lernvorteilen auf den Wissenserwerb wirken. Das Treatment “Animation mit Notizen” konkurriert jedoch auf der numerischen Ebene mit dem Treatment “Bild ohne Notizen”. Auch kleine Effekte sollen nicht unterschätzt werden, da diese über längere Zeiträume kumulativ wirken können, deshalb sollte diesem Indiz in weiteren Untersuchungen nachgegangen werden.
- Animationen können eine lernförderliche Wirkung ihrer Darstellung (Translation, Transition, Transformation) und Darstellungstechnik (Überblendung, Perspektivwechsel, Zoom-Effekt, etc.) entsprechend unterschiedlich entfalten. Eine Vergleichsuntersuchung könnte darstellungsspezifische Analysen aufstellen.
- Die erhaltenen Geschlechtsunterschiede sollten selbstverständlich noch repliziert werden, um diesem damit eine größere Aussagekraft zu verschaffen.
- Da die kompensierende Wirkung eines hohen räumlichen Vorstellungsvermögens erneut gezeigt werden konnte, was auch vorteilhaft zur Ausbildung eines guten Physikverständnisses führt, ist die Frage zu beantworten, mit welchen Methoden die Raumvorstellung überhaupt im Unterricht trainiert und verbessert werden kann.

Eine Möglichkeit wäre, von einem vorliegenden zweidimensionalen Bild ein dreidimensionales Experiment aufzubauen, wie auch umgekehrt die Zeichnung eines Demonstrationsexperiments RV-Leistungen zu fördern vermag. Weiterhin können physikalische Sachmodelle eingesetzt, gezeichnet und diskutiert werden.

Das breite Thema “Visualisierungen und Notizen im Physiklernen” verlangte eine Zusammenschau von einschlägigen Theorien und Fakten aus einer Vielzahl von Forschungsfelder, wie Wahrnehmungs- und Kognitionspsychologie, Neurobiologie, Multimediaforschung und Physikdidaktik. Dabei wurde versucht eine, dem Forschungsvorhaben angemessene Balance zwischen der Genauigkeit und dem Pragmatismus zu finden. Mit den gewonnenen Ergebnissen hofft diese Arbeit einen Schritt im wissenschaftlichen Erkenntnisprozess der Physikdidaktik getan zu haben.

11 Literaturverzeichnis

- ARNHEIM, R. (1972). *Anschauliches Denken. Zur Einheit von Bild und Begriff*. Köln: Verlag Du Mont Schauberg.
- BADDELEY, A.D. (1986). *Working memory*. Oxford, England: Oxford University Press.
- BADDELEY, A.D. (1999). *Human memory*. Boston: Allyn & Bacon.
- BALLSTAEDT, S.-P. (1997). *Wissensvermittlung. Die Gestaltung von Lernmaterial*. Weinheim: Beltz-PVU.
- BANDURA, A. (1977). Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change. *Psychological Review*, 84 (2), 191-215.
- BARKE, H.-D. (1980). Raumvorstellung im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Zeitschrift MNU*, 33, 129-133.
- BARKE, H.-D., SOPANDI, W. (2006). Raumvorstellung und Chemieverständnis – sie korrelieren! *Praxis der Naturwissenschaften (PdN-Chemie)*, 55 (1), 41-46.
- BARNEA, N., DORI, Y.J. (1999). High-School Chemistry Students' Performance and Gender Differences in a Computerized Molecular Modeling Learning Environment. *Journal of Science Education and Technology*, 8 (4), 257-271.
- BAROW, O.-A. (1990). Was ist Gestaltpädagogik? *Zeitschrift für Pädagogik*, 42 (5), 6-10.
- BAUER-WABNEGG, W., KRAUSE, J. (2003). *Visualisierung und Design. Grundlagen von Softwareergonomie und Mediendesign*. Skript, Bauhaus Universität Weimar, Universität Koblenz-Landau, Informationszentrum Sozialwissenschaften, Bonn.
- BAUMERT, J., LEHMANN, R., LEHRKE, M. et al. (1997). *TIMSS - Mathematisch-Naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich*. Deskriptive Befunde. Opladen: Leske + Budrich.
- BECKER-MROTZEK, M. (2007). *Protokollieren, Instruieren, Berichten und Beschreiben (Schreibaufgaben im naturwissenschaftlichen Unterricht)*. Vortrag auf dem Berlin-Brandenburgischen Colloquium zur Fachdidaktik Physik, Humboldt Universität, 5.12.2007.

- BERGELER, E., POSPIECH, G. (2008). Schreiben im Physikunterricht. In: Höttecke, D. (Hg.), *Kompetenzen, Kompetenzmodelle, Kompetenzentwicklung. Tagungsband zur GDGP, 2007*. Berlin: LIT Verlag, 320-322.
- BERGELER, E. (2009). *Lernen durch eigenständiges Schreiben von sachbezogenen Texten in Physikunterricht*. Technische Universität Dresden.
- BERGER, R., HÄNZE, M. (2004). Motivation, Lernen und Leistung im kooperativen Physikunterricht. In: Pitton, A. (Hg.), *Chemie- und physikdidaktische Forschung und naturwissenschaftliche Bildung. Tagungsband zur GDGP, 2003*. Münster: LIT Verlag, 247-249.
- BERGER, K., STARAUSCHEK, E. (2009). Wie erkennt und erstellt man gute Bilder? Einige Regeln zur Gestaltung von Bildern für das Physiklernen. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, Nr.109, 23-26.
- BEREITER, C. (1980). Development in writing. In: Gregg, L.W., Steinberg, E.R. (Hg.), *Cognitive Processes in Writing*. Hillsdale: Erlbaum, 73-93.
- BÉTRANCOURT, M., TVERSKY, B. (2000). Effect of computer animation on users' performance: a review. *Le Travail Humain*, 63 (4), 311-331.
- BLEICHROTH, W., DAHNCKE, H., JUNG, W., KUHN, W., MERZYN, G., WELTNER, K. (1991). *Fachdidaktik Physik*. Köln: Aulis Verlag.
- BLÖMEKE, S. (2003). Lehren und Lernen mit neuen Medien – Forschungsstand und Forschungsperspektiven. *Unterrichtswissenschaft*, 31 (1), 57-82.
- BOEHM, G. (1994). Die Wiederkehr der Bilder. In: Boehm, G. (Hg.) *Was ist ein Bild?*, München, 11-38.
- BORTZ, J. (2005, 6. Auflage). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Heidelberg: Springer Verlag.
- BORTZ, J., DÖRING, N. (2003, 3. Auflage). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- BRÄMER, R. (1977). Die Beliebtheit des naturwissenschaftlichen Unterrichts als Kriterium für seine Sozialisationswirksamkeit. *Zeitschrift für Pädagogik*, 25 (1), 259-273.
- BRENNAN, B.A. (1998). *Licht-Arbeit. Heilung mit Energiefeldern*. München: Goldmann Verlag.

- BRESLER, S., HEEPMMANN, B., MUCKENFUß, H., SCHRÖDER, W. (2003). *Natur und Technik Realschule NRW Physik 7/8*, Handreichungen für den Unterricht mit Kopiervorlagen zum Schülerbuch 851044. Berlin: Cornelsen.
- BROSIUS, F. (2004). *SPSS 12. Das mitp-Standardwerk*. Bonn: mitp-Verlag.
- BRUHN, J. (2000). Die Interessantheit der Bilder als didaktisches Problem. In: Brechel, R. (Hg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie. Tagungsband zur GDCP, 1999*. Alsbach: Leuchtturm Verlag, 345-347.
- BRÜNKEN, R., STEINBACHER, S., LEUTNER, D. (2000). Räumliches Vorstellungsvermögen und Lernen mit Multimedia. In: Leutner, D., Brünken, R. (Hg.), *Neue Medien in Unterricht, Aus- und Weiterbildung: aktuelle Ergebnisse empirischer pädagogischer Forschung*. Münster: Waxmann, 37-46.
- BRÜNKEN, R., LEUTNER, D. (2001). Aufmerksamkeitsverteilung oder Aufmerksamkeitsfokussierung? Empirische Ergebnisse zur „Split-Attention-Hypothese“ beim Lernen mit Multimedia. *Unterrichtswissenschaft*, 29, 357-366.
- BRÜNKEN, R., STEINBACHER, S., SCHNOTZ, W., LEUTNER, D. (2001). Mentale Modelle und Effekte der Präsentations- und Abrufkodalität beim Lernen mit Multimedia. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 15, 16-27.
- BUCHNER, A. (2006). Funktionen und Modelle des Gedächtnisses. In: Karnath, H.-O., Thier, P. (Hg.), *Neuropsychologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 437-447.
- BURMESTER, M. (2005). *Einführung in die Blickregistrierung*. Skript, Hochschule der Medien, Stuttgart.
- BÜHL, A. (2008, 11. Auflage). *SPSS 16. Einführung in die moderne Datenanalyse*. München: Pearson Studium.
- BÜLTHOFF, H.H., RUPPERTSBERG, A.I. (2006). Funktionale Prinzipien der Objekt- und Gesichtserkennung. In: Karnath, H.-O., Thier, P. (Hg.), *Neuropsychologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 107-116.
- CARROLL, J.B. (1993). *Human cognitive abilities: A survey of factor-analytic studies*. New York: Cambridge University Press.
- CLARK, J.O.E. (1992). *Az emberi test. Teljes áttekintés szervezetünk felépítéséről és működéséről*. Budapest: Medicina & Láng.

- CLAUSEN, S., BÜTTNER, D. (2006). Untersuchungen zur Prägnanz von Abbildungen in Büchern für den Chemieunterricht. *CHEMKON*, 13 (3), 117-123.
- CHI, M.T.H., de LEEUW, N., CHIU, M.-H., LAVANCHER, C. (1994). Eliciting Self-Explanations Improves Understanding. *Cognitive Science*, 18, 439-477.
- CRAIK, F.I.M., LOCKHART, R.S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 11, 671-684.
- CRAIK, F.I.M., TULVING, E. (1975). Depth of processing and the retention of words in episodic memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 104 (3), 268-294.
- DAHLQVIST, P. (2000). Animations in Physics Learning. In: Robson, R. (Hg.), *Proceedings of MSET, Mathematics/Science, Education and Technology*. San Diego, California, Febr. 2000. Download: http://people.dsv.su.se/~patricd/Publications/Animations_in_Physics_Learning.pdf (Stand: 7/2007), 1-6.
- DEAN, R.S., ENEMOH, P.A.C. (1983). Pictorial organisation in prose learning. *Contemporary Educational Psychologist*, 94, 428-434.
- Di VESTA, F.J., GRAY, G.S. (1972). Listening and note taking. *Journal of Educational Psychology*, 63 (1), 8-14.
- DORN, F., BADER, F. (1996). *Physik in einem Band*. Hannover: Schroedel Schulbuchverlag.
- DREWNIAK, U. (1992). *Lernen mit Bildern in Texten: Untersuchung zur Optimierung des Lernerfolgs bei Benutzung computerpräsentierter Texte und Bilder*. Münster: Waxmann.
- DUIT, R., HÄUBLER, P., MIKELSKIS, H.F., WESTPHAL, W. (1994). *Um die Welt zu begreifen. Physik 7/8, Ausgabe Niedersachsen*. Frankfurt/M., Bühl: Diesterweg, Konkordia.
- DUIT, R. (1995). Zur Rolle der konstruktivistischen Sichtweise in der naturwissenschafts-didaktischen Lehr- und Lernforschung. *Zeitschrift für Pädagogik* (Sonderdruck), 41 (6), Beltz, 905-923.
- DURST, R.K., NEWELL, G.E. (1989). The Uses of Function: James Britton's Category System and Research on Writing. *Review of Educational Research*, 59 (4), 375-394.
- DWYER, F.M. (1975). Effect of students entering behavior on visualized instruction. *Journal of experimental Education*, 43 (3), 78-83.

- ECKERT, B., ALTHERR, S., WAGNER, A., JODL, H.J. (2003). Kriterienkatalog zur Beurteilung von Multimedien. In: Nordmeier, V. (Hg.), *Didaktik der Physik – Augsburg, 2003*. CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Berlin: Lehmanns.
- EIGLER, G., JECHLE, T., MERZIGER, G., WINTER, A. (1987). Über Beziehungen von Wissen und Textproduzieren. *Unterrichtswissenschaft*, 15 (4), 382-395.
- EPSTEIN, S. (1993). Entwurf einer integrierten Persönlichkeitstheorie. In: Filipp, S.H. (Hg.), *Selbstkonzept-Forschung: Probleme, Befunde, Perspektiven*. Stuttgart: Klett-Cotta, 15-45.
- EULER, M., MÜLLER, A. (1999). Physics learning and the computer: A review, with a taste of meta-analysis. In: Komorek, M. et al. (Hg.), *Proceedings of the Second International Conference of the E.S.E.R.A.*, s.a. Download: <http://www.ipn.uni-kiel.de/projekte/esera/book/eser-book.htm>, 1-3.
- FANKHAUSER, R. (2006). Bilder lesen im naturwissenschaftlichen Unterricht. Zur Genese eines Forschungsprojektes. Artikelentwurf für die „*Zeitschrift für Medienpädagogik*“, 1-15.
- FEHER, E., RICE, K. (1988). Ein Vergleich optischer Vorstellungen von Lehrern und Schülern. *physica didactica*, 15 (2), 3-20.
- FELSER, G. (2001, 2. Auflage). *Werbe- und Konsumentenpsychologie*. Heidelberg-Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- FRIEBERTSHÄUSER, B. (1997). Interviewtechniken – ein Überblick. In: Friebertshäuser, B., Prengel, A. (Hg.), *Handbuch Qualitative Forschungsmethoden in der Erziehungswissenschaft*. Weinheim, München: Juventa-Verlag, 371-395.
- FRIEGE, G. (2001). *Wissen und Problemlösen. Eine empirische Untersuchung des wissenszentrierten Problemlösens im Gebiet der Elektrizitätslehre auf der Grundlage des Experten-Novizen-Vergleichs*. Berlin: Logos Verlag.
- FUCKE, R., KIRCH, K., NICKEL, H. (1968). *Darstellende Geometrie*. Leipzig: VEB Fachbuchverlag.
- GALILI, I. (1996). Students' conceptual change in geometrical optics. *International Journal of Science Education*, 18 (7), 847-868.
- GALILI, I., HAZAN, A. (2000). Learners' knowledge in optics: interpretation, structure and analysis. *International Journal of Science Education*, 22 (1), 57-88.

- GALMBACHER, M., HEUER, D., LIPPITSCH, S., SCHERRER, S., PLÖTZNER, R. (2004). Erwerb qualitativ physikalischer Konzepte durch dynamisch-ikonische Repräsentationen von Strukturzusammenhängen. In: Pitton, A. (Hg.), *Relevanz fachdidaktischer Forschungsergebnisse für die Lehrerbildung. Tagungsband zur GDGP, 2004*. Münster: LIT Verlag, 375-377.
- GIRWIDZ, R. (2004). Lerntheoretische Konzepte für Multimediaanwendungen zur Physik. *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1/3, 9-19.
- GIRWIDZ, R. (2006). Multimedia im Physikunterricht. Ansätze für eine theoriegeleitete Entwicklung und Anwendung. In: Pitton, A. (Hg.), *Lehren und Lernen mit neuen Medien. Tagungsband zur GDGP, 2005*. Berlin: LIT Verlag, 27-41.
- GIRWIDZ, R., RUBITZKO, T. (2006). Physik mit Bildern lernen. In: Girwidz, R., Gläser-Zikuda, M., Laukenmann, M., Rubitzko, T. (Hg.), *Lernen in Physik*, Hamburg: Kovac, 105-114.
- GIRWIDZ, R., RUBITZKO, T., SPANNAGEL, CH. (2004). Animationen in multimedialen Lernumgebungen. In: Nordmeier, V. (Hg.), *Didaktik der Physik – Düsseldorf, 2004*. CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Berlin: Lehmanns.
- GERSTBERGER, H. (1999). Sprache und Mathematisierung beim Lehren und Lernen von Physik. In: Brechel, R. (Hg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie. Probleme und Perspektiven. Tagungsband zur GDGP in Essen, 1998*. Alsbach/Bergstraße: Leuchtturm-Verlag, 59-78.
- GORDON, T. (1998). *T.E.T. – A tanári hatékonyág fejlesztése*. Budapest: Assertiv Kiadó.
- GREBE-ELLIS, J. (2006). Wissenschaft, Phänomenologie und Optik – Anmerkungen zum wissenschaftlichen Kontext der Tagung. In: Grebe-Ellis, J., Theilmann, F. (Hg.), *open eyes 2005. Ansätze und Perspektiven der phänomenologischen Optik*. Berlin: Logos, 1-4.
- GREHN, J., KRAUSE, J. (Hg., 1998). *Metzler Physik*. Hannover: Schroedel Verlag.
- GROPENGLIEßER, H. (1997). Schülervorstellungen zum Sehen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3 (1), 71-87.
- GROPENGLIEßER, H. (1999). Was die Sprache über unsere Vorstellungen sagt. Kognitionslinguistische Analyse als Methode zur Erfassung von Vorstellungen: Das Beispiel Sehen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 5 (2), 57-77.
- GUESNE, E. (1984). Die Vorstellung von Kindern über Licht. *physica didactica*, 11 (2/3), 79-98.

- GÜNTÜRKÜN, O., HAUSMANN, M., TEGENTHOFF, M. (2003). „Der kleine Unterschied“ im menschlichen Gehirn. *NEUROrubin*, 5-8.
- HAARMEIER, T. (2006). Bewegungssehen, Stereopsis und ihre Störungen. In: Karnath, H.-O., Thier, P. (Hg.), *Neuropsychologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 41-54.
- HAAS, A. (1998). *Unterrichtsplanung im Alltag – eine empirische Untersuchung zum Planungshandeln von Hauptschul-, Realschul- und Gymnasiallehrern*. Regensburg: Roderer.
- HABERLANDT, K. (1999). *Human memory: Exploration and Application*. Boston: Allyn & Bacon.
- HACKER, G. (2003). Ein neues, multimediales Unterrichtskonzept zur Optik der Sek. I. In: Nordmeier, V. (Hg.), *Didaktik der Physik – Augsburg, 2003*. CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Berlin: Lehmanns.
- HÄCKER, H.O., STAPF, K.-H. (Hg., 2004, 14. Auflage). *Dorsch Psychologisches Wörterbuch*. Bern, Göttingen, Toronto, Seattle: Huber Verlag.
- HARTLEY, J. (1983). Note-taking research: Resetting the scoreboard. *Bulletin of the British Psychological Society*, 36, 13-14.
- HASEBROOK, J.P. (1997). Wem nützt Multimedia - und warum? - Lebenslanges Lernen mit Multimedia. In: Pfammatter, R. (Hg.), *Multi-Media-Mania. Reflexionen zu Aspekten neuer Medien*. Konstanz: UVK Medien, 101-124. Download: http://www.inm.de/info/inm_info/multimedia.html (Stand: 4/2007).
- HAYES, J.R., FLOWER, L.S. (1980). Identifying the organization of writing processes. In: Gregg, L.W., Steinberg, E.R. (Hg.), *Cognitive Processes in Writing*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 3-30.
- HEBB, D.O. (1972, 5. Auflage 1995). *A pszichológia alapkérdései*. (Originaltitel: Textbook of psychology). Budapest: Gondolat – Trivium.
- HEEGE, R., SCHMIDKUNZ, H. (1997). Zur wahrnehmungsaktiven Gestaltung visueller Darstellungen. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 8 (Nr. 38), 60-64.
- HEGARTY, M., JUST, M.A. (1989). Understanding machines from text and diagrams. In: Mandl, H., Levin, J.R. (Hg.), *Knowledge aquisition from text and picture*, Amsterdam: Elsevier, 171-194.

HELLER, K.A., PERLETH, C. (2000). *Kognitiver Fähigkeitstest für 4. bis 12. Klassen, Revision*. Göttingen: Beltz Test GmbH.

HELMKE, A. (1992a). *Selbstvertrauen und Schulleistung*. Göttingen: Hogrefe.

HELMKE, A. (1992b). Determinanten der Schulleistung: Forschungsstand und Forschungsdefizit. In: Nold, G. (Hg.), *Lernbedingungen und Lernstrategien*. Tübingen: Narr, 23-34.

HENTIG, H. von (2002). *Der technischen Zivilisation gewachsen bleiben*. (Nachdenken über die neuen Medien und das gar nicht mehr allmähliche Verschwinden der Wirklichkeit). Weinheim und Basel: Beltz Verlag.

HERDT, D. (1990). *Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrgangs: Einführung in die elementare Optik*. Essen: Westarp Wissenschaften.

HERRMANN, F. (1995a). *Der Karlsruher Physikkurs I*. Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe I, Teil 1. Karlsruhe: Didaktik der Physik, Universität Karlsruhe.

HERRMANN, F. (1995b). *Der Karlsruher Physikkurs II*. Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe I, Teil 2. Karlsruhe: Didaktik der Physik, Universität Karlsruhe.

HERRMANN, F. (1995c). *Der Karlsruher Physikkurs III*. Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe I, Teil 2. Karlsruhe: Didaktik der Physik, Universität Karlsruhe.

HESSE, H. (1922, 1. Erscheinung 1953). *Siddhartha*. Suhrkamp Verlag.

HOFMANN, B., NORDMEIER, V., STARAUSCHEK, E. (2008). Blickbewegungsanalyse beim Lesen von physikbezogenen Texten mit Bildern. In: Höttecke, D. (Hg.), *Kompetenzen, Kompetenzmodelle, Kompetenzentwicklung. Tagungsband zur GDGP, 2007*. Berlin: LIT Verlag, 356-358.

HOFMANN, B., NORDMEIER, V. (2008): Wie lesen SchülerInnen physikbezogene Texte? In: Nordmeier, V. (Hg.), *Didaktik der Physik – Berlin, 2008*. CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Berlin: Lehmanns.

HOFMANN, B., NORDMEIER, V., VOBKÜHLER, A., STARAUSCHEK, E. (2009). Lassen sich mit Eye Tracking Lernschwierigkeiten beim Lesen von physikbezogenen Texten erkennen? In: Höttecke, D. (Hg.), *Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung. Tagungsband zur GDGP, 2008*. Berlin: LIT Verlag, 244-246.

HOFFMANN, L., HÄUBLER, P., LEHRKE, M. (1998). Die IPN-Interessenstudie Physik. IPN 158. Kiel: Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften.

- HOFFMANN, K., WIESNER, H. (1982). Lassen sich Alltagsvorstellungen über optische Phänomene durch Unterricht wirksam korrigieren? *physica didactica*, 9, 299-317.
- HOPF, C., RIEKER, P., SANDEN-MARCUS, M., SCHMIDT, C. (1995). *Familie und Rechtsextremismus. Familiäre Sozialisation und rechtsextreme Orientierungen junger Männer*. Weinheim, München: Juventa Verlag.
- HÖFFLER, T.N., LEUTNER, D. (2005). *Instruktionale Animationen versus Standbilder: Eine Metaanalyse*. Präsentation anlässlich der 66. Tagung der Arbeitsgruppe für Empirische Pädagogische Forschung (AEPF) in Berlin.
- HÖFFLER, T.N., LEUTNER, D. (2006). *Instructional Animation versus Static Pictures: A Meta-Analysis*. Proposal for a „New Member Poster“ on the 2006 Annual Meeting of the American Educational Research Association (AERA), 1-5.
- HÖFFLER, T.N. (2007). *Lernen mit dynamischen Visualisierungen: Metaanalyse und experimentelle Untersuchungen zu einem naturwissenschaftlichen Lerninhalt*. Essen: Universität Duisburg-Essen. Elektronische Dissertation; <http://duepublico.uni-duisburg-essen.de>
- HUK, T., STEINKE, M., FLOTO, C. (2003a). Learning with educational hypermedia software: the impact of signals in animations. In: Isaias, P., Karmakar, N. (Hg.), *IADIS International Conference WWW/Internet*, Algarve, Portugal, 689-695.
- HUK, T., STEINKE, M., FLOTO, C. (2003b). The educational value of cues in computer animations and its dependence on individual learners abilities. In: Lassner, D., McNaught, C. (Hg.), *ED-MEDIA – World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications*, Honolulu, Hawaii, USA: AACE, 2658-2661.
- HUK, T., STEINKE, M., FLOTO, C. (2003c). Computer animations as learning objects: what is an efficient instructional design, and for whom? In: Isaias, P., Karmakar, N. (Hg.), *IADIS International Conference WWW/Internet*, Algarve, Portugal, 1187-1190.
- HUXLEY, A. (1994). *The doors of perception, and, Heaven and hell*. London: Flamingo.
- HÜLLEN, R., SUMFLETH, E. (2004). *Lernen mit chemischen Sachtexten anhand selbstgenerierter Bilder*. Vortrag, Doktoranden-Kolloquium der GDCP 2004 in Calw.
- JANCKE, D., CHAVANE, F., NAAMAN, S., GRINVALD, A. (2004). Imaging cortical correlates of illusion in early visual cortex. *Nature*, 428, 423-426.

- JERUSALEM, M., SATOW, L. (1999). Schulbezogene Selbstwirksamkeitserwartungen. In: Schwarzer, R., Jerusalem, M. (Hg.), *Skalen zur Erfassung von Lehrer- und Schülermerkmalen, Dokumentation der psychometrischen Verfahren im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung des Modellversuches „Selbstwirksame Schulen“*. Berlin: FU Berlin, 15-16.
- JOSEPH, J.H., DWYER, F.M. (1984). The effects of prior knowledge, presentation mode and visual realism on student achievement. *Journal of Experimental Education*, 52, 110-121.
- JUNG, W. (1979). *Optik für die Sekundarstufe I*. Frankfurt/M.: Diesterweg.
- JUNG, W. (1981). Erhebungen zur Schülervorstellungen in Optik (Sekundarstufe I). *physica didactica*, 8, 137-155.
- JUNG, W. (1986). Alltagsvorstellungen und das Lernen von Physik und Chemie. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie*, 34 (13), 100-104.
- JUNG, W. (1989). Pänomenologisches vs physikalisches optisches Schema als Interpretationsinstrumente bei Interviews. *physica didactica*, 16 (4), 35-46.
- KALYUGA, S., AYRES, P., CHANDLER, P., SWELLER, J. (2003). Expertise reversal effect. *Educational Psychologist*, 38, 23-31.
- KASPER, L. (2006). *Diskursiv-narrative Elemente für den Physikunterricht. Entwicklung und Evaluation einer multimedialen Lernumgebung zum Erdmagnetismus*. Dissertation, Universität Potsdam.
- KEBECK, G. (1997, 2. Auflage). *Wahrnehmung. Theorien, Methoden und Forschungsergebnisse der Wahrnehmungspsychologie*. Wernheim, München: Juventa Verlag.
- KERRES, M. (1998). *Multimediale und telemediale Lernumgebungen. Konzeption und Entwicklung*. München, Wien: Oldenbourg.
- KIEWRA, K.A., DuBOIS, N.F., CHRISTIAN, D., McSHANE, A., MEYERHOFFER, M., ROSKELEY, D. (1991). Note-taking functions and techniques. *Journal of Educational Psychology*, 83 (2), 240-245.
- KINTSCH, W. (1998). *Comprehension. A paradigm for cognition*. Cambridge: University Press.
- KIRCHER, E., GIRWIDZ, R., HÄUBLER, P. (2000). *Physikdidaktik. Eine Einführung in Theorie und Praxis*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.

- KLIEME, E., BAUMERT, J. (Hg., 2001a). *TIMSS – Impulse für Schule und Unterricht. Forschungsbefunde, Reforminitiativen, Praxisberichte und Video-Dokumente*. Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- KLIEME, E., BAUMERT, J. (2001b). Identifying national cultures of mathematics education: Analysis of cognitive demands and differential item functioning in TIMSS. *European Journal of Psychology in Education*, 16(3), 385–402.
- KLIEME, E., SCHÜMER, G., KNOLL, S. (2001). Mathematikunterricht in der Sekundarstufe I: “Aufgabekultur” und Unterrichtsgestaltung. In: Klieme, E., Baumert, J. (Hg.), *TIMSS – Impulse für Schule und Unterricht. Forschungsbefunde, Reforminitiativen, Praxisberichte und Video-Dokumente*. Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung, 43–57.
- KLIEME, E., RAKOCZY, K. (2003). Unterrichtsqualität aus Schülerperspektive. In: Baumert, J. et al. (Hg.), *Pisa 2000 - Ein differenzierter Blick auf die Länder der Bundesrepublik Deutschland*. Opladen: Leske u. Budrich, 334-359.
- KOSSLYN, S.M., POMERANTZ, J.R. (1992). Bildliche Vorstellungen, Propositionen und die Form interner Repräsentation. In: Münch, D. (Hg.), *Kognitionswissenschaften: Grundlagen, Probleme, Perspektiven*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 253-289.
- KOSSLYN, S.M. (1994). *Image and Brain: The Resolution of the Imagery Debate*. Cambridge: Bradford Books.
- KÖLLER, O., BAUMERT, J. (2002). Entwicklung schulischer Leistungen. In: Oerter, R., Montada, L. (Hg.), *Entwicklungspsychologie*. Weinheim: Beltz, 756-786.
- KRAMER, B. (2005). „*Mentale Integration von Text und Bild beim Lernen mit Multimedia am Beispiel der olfaktorischen Signaltransduktion*“. Elektronisch veröffentlichte Dissertation. Download: www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/publikationen.html (Stand: 3/2006).
- KRAPP, A. (1998). Interesse. In: Rost, D. (Hg.), *Handwörterbuch Pädagogische Psychologie*. Weinheim: Beltz/ PVU, 213-218.
- KRAPP, A. (1999). Intrinsische Lernmotivation und Interesse. *Zeitschrift für Pädagogik*, 45 (3), 387-406.
- KULIK, C.-L., KULIK, J.A. (1991). Effectiveness of computer-based instruction: An updated analysis. *Computers in Human Behavior*, 7 (1-2), 75-94.
- LABUDDE, P., GERBER, B., KNIERIM, B. (2006). *Schlussbericht zum Projekt „Lehr-Lern-Kultur im Physikunterricht: eine Videostudie“*. Bern: PH Bern, Institut Sekundarstufe II. Download: <http://www.phbern.ch/index.php?id=408> (Stand: 2/2007).

- LAUX, G. (1984). Die Lochkamera als Zugang zur Optik. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie*, 32 (2), 37-41.
- LEISEN, J. (Hg., 1999). *Methoden-Handbuch Deutschsprachiger Fachunterricht (DFU)*. Bonn: Varus Verlag.
- LEISEN, J. (2004). *Hinweise zum Experimentieren*. Handreichung. Staatliches Studienseminar für das Lehramt an Gymnasien in Koblenz.
- LEISEN, J. (2008). *Schreiben im Physikunterricht*. Vortrag auf dem Arbeitstreffen „Schreiben im Physikunterricht“, TU-Dresden, 13.3.2008.
- LEVIE, H.V., LENTZ, R. (1982). Effects of text illustrations: A review of research. *Educational Communication and Technology Journal*, 30, 195-132.
- LEVIN, J.R., ANGLIN, G.J., CAMEY, R.N. (1987). On empirically validating functions of pictures in prose. In: Willows, D.M., Houghton, H.A. (Hg.), *The psychology of illustration: Vol. 1: Basic research*. New York: Springer, 51-85.
- LEWALTER, D. (1997a). *Lernen mit Bildern und Animationen. Studie zum Einfluß von Lernermerkmalen auf die Effektivität von Illustrationen*. Münster, New York, München, Berlin: Waxmann.
- LEWALTER, D. (1997b). Kognitive Informationsverarbeitung beim Lernen mit computerpräsentierten statischen und dynamischen Illustrationen. *Unterrichtswissenschaft*, 25 (3), 207-222.
- LEWALTER, D. (2003). Cognitive strategies for learning from static and dynamic visuals. *Learning and Instruction*, 13, 177-189.
- LEX, E., GUNACKER, E. (1998). Der Physik- und Chemieunterricht aus der Sicht des Schülers. *Plus Lucis*, 3, 7-12.
- LIPOWSKY, F. (2006). Auf den Lehrer kommt es an. In: Allemann-Ghionda, C., Terhart, E. (Hg.), *Kompetenz und Kompetenzentwicklung von Lehrerinnen und Lehrern: Ausbildung und Beruf*. Weinheim: Beltz, 47-70.
- LOWE, R.K. (1993). Constructing a mental representation from an abstract technical diagram. *Learning and Instruction*, 3 (3), 157-179.
- LOWE, R.K. (1998). Verarbeitungsanforderungen beim Verstehen komplexer animierter Bilder. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 12 (2/3), 125-134.

- LOWE, R.K. (1999). Extracting information from an animation during complex visual learning. *European Journal of Psychology of Education*, 14 (2), 225-244.
- LOWE, R.K. (2001). Understanding information presented by complex animated diagrams. In: Rouet, J.-F., Levonen, J., Biardeau, A. (Hg.), *Multimedia learning – Cognitive and instructional issues*. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 65-74.
- LOWE, R.K. (2003). Animation and learning: selective processing of information in dynamic graphics. *Learning and Instruction*, 13, 157-176.
- MARKOWITSCH, H.J. (2006). Neuroanatomie und Störungen des Gedächtnisses. In: Karnath, H.-O., Thier, P. (Hg.), *Neuropsychologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 448-462.
- MARMOLIN, H. (1991). Multimedia from the Perspectives of Psychology. In: Kjelldahl, L. (Hg.), *Multimedia. Systems, Interaction and Application*. Berlin: Springer Verlag, 39-54.
- MAYER, R.E., GALLINI, J.K. (1990). When is an illustration worth ten thousand words? *Journal of Educational Psychology*, 82 (4), 715-726.
- MAYER, R.E., ANDERSON, R.B. (1991). An experimental test of a dual-coding hypothesis. *Journal of Educational Psychology*, 83 (4), 484-490.
- MAYER, R.E. (1997). Multimedia learning: Are we asking the right questions? *Educational Psychologist*, 32 (1), 1-19.
- MAYER, R.E. (2001). *Multimedia learning*. Cambridge University Press.
- MAYER, R.E., CHANDLER, P. (2001). When learning is just a click away: Does simple user interaction foster deeper understanding of multimedia messages? In: *Journal of Educational Psychology*, 93 (2), 390-397.
- MAYER, R.E., MORENO, R. (2002). Animation as an aid to multimedia Learning. *Educational Psychology Review*, 14 (1), 87-99.
- MAYRING, P. (2000). *Qualitative Inhaltsanalyse*. Weinheim: Deutscher Studien Verlag.
- MAYRING, P. (2002). *Einführung in die qualitative Sozialforschung*. Weinheim, Basel: Beltz-Verlag.
- MEER, E. van der (1996). Gesetzmäßigkeiten und Steuerungsmöglichkeiten des Wissenserwerbs. In: Birbaumer, N., Frey, D., Kuhl, J., Weinert, F.E. (Hg.), *Enzyklopädie der Psychologie, Pädagogische Psychologie (Bd.2), Psychologie des Lernens und der Instruktion*. Göttingen: Hogrefe-Verlag, 209-248.

- MERZYN, G. (1984). Zur Optik in der Sekundarstufe I. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie*, 32 (2), 33-37.
- METZGER, W. (1975). *Gesetze des Sehens*. Frankfurt/M.: W. Kramer-Verlag.
- MIETZEL, G. (2002, 4. Auflage). *Wege in die Entwicklungspsychologie. Kindheit und Jugend*. Weinheim: Beltz Psychologie Verlags Union.
- MIETZEL, G. (2007, 8. Auflage). *Pädagogische Psychologie des Lernens und Lehrens*. Göttingen: Hogrefe-Verlag.
- MIKELSKIS, H.F. (2004). Multimedialernen im naturwissenschaftlichen Unterricht 1: Ansätze eines Forschungsparadigmas zwischen Fachdidaktik und Psychologie. In: Pitton, A. (Hg.), *Chemie- und physikdidaktische Forschung und naturwissenschaftliche Bildung. Tagungsband zur GDGP, 2003*. Münster: LIT Verlag, 108-110.
- MIKELSKIS, H.F, WILKE, H.-J. (Hg., 2000). *Physik plus*. Lehrbuch für das Gymnasium Klassen 7/8, Thüringen. Berlin: Volk und Wissen.
- MIKELSKIS, H.F, WILKE, H.-J. (Hg., 2003). *Physik plus*. Lehrbuch für das Gymnasium Klassen 9/10, Brandenburg. Berlin: Volk und Wissen.
- MIYAKE, A., FRIEDMAN, N.P., RETTINGER, D.A., SHAH, P., HEGARTY, M. (2001). How are visuospatial working memory, executive functioning and spatial abilities related? A latent-variable analysis. *Journal of Experimental Psychology*, 130, 621-640.
- MORENO, R., MAYER, R.E. (2000). Engaging students in active learning: The case for personalized multimedia messages. *Journal of Educational Psychology*, 92 (4), 724-733.
- MORRISON, J.B., TVERSKY, B., BÉTRANCOURT, M. (2000). *Animation: Does it facilitate learning?* Präsentation anlässlich der Proceedings of the AAAI 2000 Spring Symposium Smart Graphics (pp 53-60), 20-22 March 2000, Stanford, CA, USA.
- MUCKENFUß, H. (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext – Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts*. Berlin: Cornelsen.
- MUCKENFUß, H. (1996). Vorschläge zur Komplexitätsreduktion bei der Abbildung mit Sammellinsen. *Praxis der Naturwissenschaften (PdN-Physik)*, 45 (8), 14-16.
- MÜLLER, H., KRUMMENACHER, J. (2006). Funktionen und Modelle der selektiven Aufmerksamkeit. In: Karnath, H.-O., Thier, P. (Hg.), *Neuropsychologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 239-253.

- NERDEL, C. (2003). *Die Wirkung von Animation und Simulation auf das Verständnis von Stoffwechselphysiologischen Prozessen*. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Elektronische Dissertation: http://e-diss.uni-kiel.de/diss_727/ (Stand 7/2007).
- NEUROTH, J., SUMFLETH, E. (2005). Chemielernen unterstützt durch Mapping als Visualisierungsstrategie. In: Pitton, A. (Hg.), *Relevanz fachdidaktischer Forschungsergebnisse für die Lehrerbildung. Tagungsband zur GDCP, 2004*. Münster: LIT Verlag, 381-383.
- NIESWANDT, M. (1997). *Verstehendes Lernen im Chemieunterricht: Schreiben als Mittel*. IPN Kiel.
- PARK, O.-C., HOPKINS, R. (1993). *Instructional conditions for using dynamic visual displays: a review*. *Instructional Science*, 21, 427-449.
- PATTERSON, E.W. (2001). Structuring the composition process in scientific writing. *International Journal of Science Education*, 23, pp. 1-16.
- PEECK, J. (1994). Wissenserwerb mit darstellenden Bildern. In: Weidenmann, B. (Hg.), *Wissenserwerb mit Bildern*. Bern, Göttingen, Toronto, Seattle: Huber, 59-94.
- PETRI, J. (2001). *Lernen in Multimedia-Umgebungen: pädagogisch-psychologische Grundlagen, aktuelle Konzeptionen, empirische Ergebnisse*. Arbeitspapier im Projekt "physik multimedial". Universität Bremen, Institut für Didaktik der Physik.
- PETRI, J., NIEDDERER, H. (2001). Kognitive Schichtenstrukturen nach einer UE Atomphysik (Sek II). *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 7, 53-68.
- PLÖTZNER, R., LOWE, R. (2004). Dynamic visualisations and learning. *Learning and Instruction*, 14, 235-240.
- PRECHTL, H., SCHENZER, M., URHAHNE, D., DAVIER, M. von (1998). Gestaltung und Wirkung einer computergestützten Lernumgebung zur Neurobiologie. In: Bayrhuber, H., Unterbruner, U. (Hg.), *Lehren und Lernen im Biologieunterricht*. Innsbruck, Wien, München: Studien Verlag, 238-249.
- PRENZEL, M., ROST, J., SENKBEIL, M., HÄUßLER, P., KLOPP, A. (2001). Naturwissenschaftliche Grundbildung: Testkonzeption und Ergebnisse. In: Deutsches PISA-Konsortium (Hg.), *PISA 2000. Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schüler im Vergleich*. Opladen: Leske + Budrich, 191-248.
- PRIEMER, B. (2004). *Physiklernen mit dem Internet*. Frankfurt/M.: Peter Lang GmbH.

- PRIBYL, J.R., BODNER, G.M. (1987). Spatial ability and its role in organic chemistry: A study of four organic courses. *Journal of Research in Science Teaching*, 24 (3), 229-240.
- PYTER, M. (1994). Textpräsentation in Hypertextprogrammen. In: Pawlik, K. (Hg.), *39. Kongreß der Deutschen Gesellschaft für Psychologie, 25.-29.9.1994 in Hamburg*. Abstracts Band II. Hamburg: Psychologisches Institut I der Universität Hamburg.
- RABE, T., STARAUSCHEK, E., MIKELSKIS, H.F. (2004). Textkohärenz und Selbsterklärung beim Lernen mit Texten im Physikunterricht. Ergebnisse einer Vorstudie zur lokalen Textkohärenz. In: Nordmeier, V., Oberländer, A. (Hg.), *Didaktik der Physik – Düsseldorf, 2004*. CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Berlin: Lehmanns Media.
- RABE, T. (2006a). *Textgestaltung und Aufforderung zu Selbsterklärungen beim Physiklernen mit Multimedia*. Dissertation, Universität Potsdam.
- RABE, T. (2006b). Motivation, Interesse und Selbstkonzept im Physikunterricht. In: Mikelskis, H.F. (Hg.), *Physikdidaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II*. Berlin: Cornelsen Verlag Scriptor, 253-269.
- RAYNER, K. (Hg.). (1992). *Eye Movements and Visual Cognition: Scene perception and reading*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- RAYNER, K., FOORMAN, B.R., PERFETTI, C.A., PESETSKY, D., SEIDENBERG, M.S. (2001). How psychological science informs the teaching of reading. *Psychological Science in the Public Interest*, 2 (2), 31-74.
- REINHOLD, P. (1996). *Offenes Experimentieren und Physiklernen*. Kiel: IPN.
- REISBERG, D. (1987). External representations and the advantages of externalizing one's thought. In: Hunt, E. (Hg.), *Proceedings of the 9th annual conference of the Cognitive Science Society*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 281-293.
- RENKL, A., ATKINSON, R.K. (2003). Structuring the transition from example study to problem solving in cognitive skill acquisition: A cognitive load perspective. *Educational Psychologist*, 38 (1), 15-22.
- RIEBER, L.P. (1990). Using Computer Animated Graphics in Science Instruction With Children. *Journal of Educational Psychology*, 82 (1), 135-140.
- RIEBER, L.P., KINI, A.S. (1991). Theoretical foundations of instructional applications of computer-generated animated visuals. *Journal of Computer Based Instruction*, 18 (3), 83-88.

- ROHR, G. (1988). Grundlagen menschlicher Informationsverarbeitung. In: Balzert, H. et al. (Hg.), *Einführung in die Software-Ergonomie*. Berlin, New York: Verlag de Gruyter, 27-48.
- RÒKÀNÈ KALYDI, B. (1997). *500 kérdés és válasz a fizika köréből*. Debrecen: Tóth Könyvkereskedés Kft.
- ROST, J. (1996). *Lehrbuch Testtheorie, Testkonstruktion*. Bern: Verlag Hans Huber.
- ROßMANITH, T. (2001). *Informationsverhalten und Involvement im Internet. Eine Labor- und Feldstudie zu den Determinanten der Informationsnachfrage im World Wide Web*. Karlsruhe: Dissertation.
- RUBITZKO, T., GIRWIDZ, R. (2004). Kognitive Flexibilität durch verschiedene externe Repräsentationen. Multimediaanwendung zur Wärmelehre. In: Pitton, A. (Hg.), *Chemie- und physikdidaktische Forschung und naturwissenschaftliche Bildung. Tagungsband zur GDGP, 2003*. Münster: LIT Verlag, 262-264. Download: <http://www.film-phl.de/> (Stand: 2/2007).
- RUBITZKO, T., GIRWIDZ, R. (2005). Fotografieren mit einer virtuellen Kamera – Lernchance für Anfänger und Fortgeschrittene. In: Nordmeier, V., Oberländer, A. (Hg.), *Didaktik der Physik – Berlin, 2005*. CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Berlin: Lehmanns Media.
- RUBITZKO, T. (2006). *Aktives Lernen mit multiplen Repräsentationen. Zur Vermittlung komplexer physikalischer Inhalte mit Texten, Bildern, Animationen und Simulationen*. Dissertation, Pädagogische Hochschule Ludwigsburg.
- RÜHENBECK, C. (1997). Bilder. *Praxis der Naturwissenschaften/ Physik*, 4, 37-46.
- RUSTEMEYER, R., JUBEL, A. (1996). Geschlechtsspezifische Unterschiede im Fach Mathematik hinsichtlich der Fähigkeitseinschätzung, Leistungserwartung, Attribution sowie im Lernaufwand und im Interesse. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 10, 13-25.
- SALOMON, G. (1979). *Interaction of media, cognition and learning: an exploration of how symbolic forms cultivate mental skills and affect knowledge acquisition*. San Francisco: Jossey-Bass.
- SALOMON, G. (1994). *Interaction of media, cognition, and learning*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

SANDOMIR, M.R., STAHL, R.J., VERDI, M.P. (1993, April). The atom is/ is not a „solar system“ or an „electron cloud“: Metaphors as aids to and interferers of acquiring appropriate science content and conceptions – An information constructivist perspective and preliminary findings. Paper presented at the 66th annual meeting of the *National Association for research in Science teaching*, Atlanta, GA.

SCHANZE, S. (2004). Das Projekt Collaborative Laboratories for Europe (Co-Lab). In: Pitton, A. (Hg.), *Chemie- und physikdidaktische Forschung und naturwissenschaftliche Bildung. Tagungsband zur GDGP, 2003*. Münster: LIT Verlag, 93-95.

SCHMIDKUNZ, H. (1983). Die Gestaltung chemischer Demonstrationsexperimente nach wahrnehmungspsychologischen Erkenntnissen. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie*, 31 (10), 360-367.

SCHMIDKUNZ, H. (1992). Die Symmetrie als Prägnanz-bildender Faktor bei chemischen Experimenten. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 3 (11), 12-16.

SCHMIDKUNZ, H., BÜTTNER, D. (1992). Aufbau und Durchführung chemischer Demonstrationsexperimente. Die Wirkungsweise gestaltpsychologischer Faktoren, dargestellt an einem konkreten Beispiel. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 3 (14), 131-135.

SCHMIDKUNZ, H., KLAETSCH, H. (1996). Zum Einfluß der Hintergrundfarben auf die visuelle Wahrnehmung von chemischen Experimentieranordnungen - eine empirische Studie. *CHEMKON*, 3 (3), 120-122.

SCHMIDKUNZ, H. (2003). Die visuelle Wahrnehmung von Stativen bei chemischen Experimenten. *Chemie & Schule*, 18 (4), 7-10.

SCHMIDKUNZ, H. (2004). Das Gesetz der Dynamik von links nach rechts bei chemischen Demonstrationen. *CHEMKON*, 11 (3), 137-140.

SCHNOTZ, W., PICARD, E., HRON, A. (1993). How do successful and unsuccessful learners use texts and graphics. *Learning and Instruction*, 20 (3), 181-199.

SCHNOTZ, W., BÖCKHELER, J., GRZONDZIEL, H., GÄRTNER, I., WÄCHTER, M. (1998). Individuelles und kooperatives Lernen mit interaktiven animierten Bildern. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 12 (2/3), 135-145.

SCHNOTZ, W. (1994). *Aufbau von Wissensstrukturen. Untersuchungen zur Kohärenzbildung beim Wissenserwerb mit Texten*. Weinheim: Beltz-PVU.

SCHNOTZ, W. (1998). Conceptual Change. In: Rost, D.H. (Hg.), *Handwörterbuch Pädagogische Psychologie*. Weinheim: Beltz, 556-560.

- SCHNOTZ, W. (1999). Sprach- und Bildkommunikation beim Lernen in den Naturwissenschaften. In: Brechel, R. (Hg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie. Probleme und Perspektiven. Tagungsband zur GDCP in Essen, 1998*. Alsbach/Bergstraße: Leuchtturm-Verlag, 31-46.
- SCHNOTZ, W., BÖCKHELER, J., GRZONDZIEL, H. (1999). Individual and co-operative learning with interactive animated pictures. *European Journal of Psychology of Education*, 14, 245-265.
- SCHNOTZ, W., BANNERT, M. (1999). Einflüsse der Visualisierungsform auf die Konstruktion mentaler Modelle beim Text- und Bildverstehen. *Zeitschrift für Experimentelle Psychologie*, 46 (3), 217-236.
- SCHNOTZ, W., SEUFERT, T., BANNERT, M. (2001). Lernen mit Multimedia: Pädagogische Verheißungen aus kognitionspsychologischer Sicht. In: Silbereisen, R.K., Reitzle, M. (Hg.), *Psychologie 2000. Bericht über den 42. Kongreß der Deutschen Gesellschaft für Psychologie*. Lengerich: Pabst Science, 457-467.
- SCHNOTZ, W. (2001). Wissenserwerb mit Multimedia. *Unterrichtswissenschaft*, 29 (4), 292-318.
- SCHNOTZ, W. (2002a). Wissenserwerb mit Texten, Bildern und Diagrammen. In: Issing, L.J., Klimsa, P. (Hg.), *Information und Lernen mit Multimedia und Internet. Lehrbuch für Studium und Praxis*. Weinheim: Beltz-PVU, 65-81.
- SCHNOTZ, W. (2002b). Enabling, facilitating, and inhibiting effects in learning from animations. In: Ploetzner, R. (Hg.), *Proceedings of the International Workshop on Dynamic Visualizations and Learning*. Tübingen: Knowledge Media Research Center. Download: <http://www.iwm-kmrc.de/workshops/visualization> (Stand: 7/2007), 1-10.
- SCHNOTZ, W. (2003). *Lernen mit Neuen Medien: Pädagogische Verheißungen und empirische Befunde*. Universität Koblenz-Landau, Download: <http://ddi.cs.uni-potsdam.de/GML2003/Hauptvortraege/Schnotz2003.ppt> (Stand: 2/2007).
- SCHWAN, S., GASSOFFKY, B., HESSE, F.W. (2000). Do film cuts facilitate the perceptual and cognitive organization of activity sequences? *Memory & Cognition*, 28, 214-223.
- SCHULMEISTER, R. (2002). Taxonomie der Interaktivität von Multimedia – Ein Beitrag zur aktuellen Metadaten-Diskussion. *It+ti – Informationstechnik und Technische Informatik*, 44 (4), 193-199.
- SEIFFGE - KRENKE, I. (1981). *Arbeitsbuch Psychologie II. Wahrnehmung*. Düsseldorf: Cornelsen.

SEUFERT, T., BRÜNKEN, R. (2005). *Zum effektiven Einsatz von Bildern als „Denkwerkzeug“*. 67. Tagung der AEPF 2005, Salzburg: Universität Salzburg. 19.-21.09.2005

SIMONYI, K. (2001, 3.Auflage). *Kulturgeschichte der Physik*. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch.

SEUFERT, T., ZANDER, S., BRÜNKEN, R. (2007). Das Generieren von Bildern als Verstehenshilfe beim Lernen aus Texten. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie*, 39, 33-42.

SLANČÍK, K., STARAUSCHEK, E., MIKELSKIS, H.F. (2005). Bedingungen für die Gestaltung von Animationen beim Physiklernen. In: Pitton, A. (Hg.), *Relevanz fachdidaktischer Forschungsergebnisse für die Lehrerbildung. Tagungsband zur GDGP, 2004*. Münster: LIT Verlag, 390-392.

STACHELSCHIED, K., TESTRUT, S. (1995). Filme: Die Bedeutung der Text-Bild-Relation. In: Behrend, R. (Hg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie. Tagungsband zur GDGP, 1994*. Alsbach: Leuchtturm Verlag, 350-352.

STACHELSCHIED, K. (2002). Untersuchung zur Lernsoftware „Ozon der Troposphäre“. In Brechel, R.(Hg.). *Zur Didaktik der Physik und Chemie. Tagungsband zur GDGP, 2001*. Alsbach: Leuchtturm-Verlag, 189-191.

STARAUSCHEK, E. (2001). *Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs - Ergebnisse einer Evaluationsstudie*. Berlin: Logos Verlag.

STARAUSCHEK, E. (2003). Elektrizitätslehre nach dem Karlsruher Physikkurs. Ergebnisse einer empirischen Studie. *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1/2, 39-47.

STARAUSCHEK, E., SLANČÍK, K. (2003). *Die optische Abbildung mit der Lochkamera (Teil I-III)*. Lernprogramm mit statischen Bildern. Text, Idee: Starauschek E.; Mitarbeit: Rabe, T., Slančík, K.; Bildideen: Starauschek, E., Slančík, K.; Bildgestaltung, Erprobung, Programmierung: Slančík, K.; Universität Potsdam.

STARAUSCHEK, E., SLANČÍK, K. (2004). *Die optische Abbildung mit der Lochkamera (Teil I-II)*. Lernprogramm mit animierten Bildern. Text, Idee: Starauschek E.; Mitarbeit: Slančík, K.; Bildideen: Starauschek, E., Slančík, K.; Bild- und Animationsgestaltung, Programmierung, Erprobung: Slančík, K.; Universität Potsdam.

- STARAUŠCHEK, E., RABE, T. (2004). Multimedialernen im naturwissenschaftlichen Unterricht 3: Bemerkungen zu kognitionspsychologischen Lerneffekten multimedialer Wissenspräsentation beim Physiklernen. In: Pitton, A. (Hg.), *Chemie- und physikdidaktische Forschung und naturwissenschaftliche Bildung. Tagungsband zur GDGP, 2003*. Münster: LIT Verlag, 114-116.
- STARAUŠCHEK, E. (2006a). Unterstützen lautes Sprechen, verständliche Texte und Bilder den Wissenserwerb zur optischen Abbildung mit der Lochkamera? In: Pitton, A. (Hg.), *Lehren und Lernen mit neuen Medien. Tagungsband zur GDGP, 2005*. Berlin: LIT Verlag, 60-62.
- STARAUŠCHEK, E. (2006b). Der Einfluss von Textkohäsion und gegenständlichen externen piktoralen Repräsentationen auf die Verständlichkeit von Texten zum Physiklernen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 12, 127-157.
- STARAUŠCHEK, E. (2006c). Ein Multimediaeffekt beim Wissenserwerb in Physik. In: Pitton, A. (Hg.), *Lehren und Lernen mit neuen Medien. Tagungsband zur GDGP, 2005*. Berlin: LIT Verlag, 402-404.
- STARAUŠCHEK, E. (2007). Physiklernen mit der *scripted cooperation* und lokal kohäsiven Texten. In: Höttecke, D. (Hg.), *Naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich. Tagungsband zur GDGP, 2006*. Berlin: LIT Verlag.
- STARAUŠCHEK, E. (2008). *Wie wirken sich Aufforderungen zum „Lesen“ und „Schreiben“ auf den Wissenserwerb beim Physiklernen aus?* Vortrag auf dem Arbeitstreffen „Schreiben im Physikunterricht“, TU-Dresden, 13.3.2008.
- STRÜBING, J. (2004; 2. Auflage, 2008). *Grounded Theory*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- STRZEBKOWSKI, R., KLEEBERG, N. (2002). Interaktivität und Präsentation als Komponenten multimedialer Lernanwendungen. In: Issing, L.J., Klimsa, P. (Hg.), *Information und Lernen mit Multimedia und Internet*, Weinheim: Beltz-PVU, 229-246.
- SUHR, W. (2003). Zur Entwicklung und Erprobung einer hypermedialen Praktikumsanleitung. In: Nordmeier, V. (Hg.), *Didaktik der Physik – Augsburg, 2003*. CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Berlin: Lehmanns.
- SUMFLETH, E., TELGENBÜSCHER, L. (2000a). Chemielernen mit Bildern durch aktive Gestaltung der Lernumgebung – Beispiel Additionsreaktionen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 6, 97-113.

- SUMFLETH, E., TELGENBÜSCHER, L. (2000b). Zum Einfluß von Bildmerkmalen und Fragen zum Bild beim Chemielernen mit Hilfe von Bildern – Beispiel Massenspektrometrie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 6, 59-78.
- SUMFLETH, E., TIEMANN, R. (2000). Bilder und Begriffe – Repräsentieren sie ähnliche Inhalte? *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 6, 115-127.
- SUMFLETH, E., TELGENBÜSCHER, L. (2001). Förderung der Verarbeitungsintensität beim Chemielernen mit Hilfe von Bildern. Finkbeiner, C., Schnaitmann, G. (Hg.), *Lehren und Lernen im Kontext empirischer Forschung und Fachdidaktik, Reihe Innovation und Konzeption*. Donauwörth: Auer-Verlag, 439-458.
- SUMFLETH, E., HÜLLEN, R., TELGENBÜSCHER, L. (2002). Optimierung von Bildern im Chemieunterricht. *CHEMKON*, 9 (3), 122-129.
- SUMFLETH, E., HOLLSTEIN, A. (2005). Lernen mit selbstkonstruierten Simulationen im Themenbereich Kugelteilchenmodell. *Zeitschrift MNU*, 58 (6), 350-357.
- SWELLER, J., LEVINE, M. (1982). Effects of goal specificity on means-ends analysis and learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 8, 463-474.
- SZABÓNÈ VÁRNAI, À., REINHOLD, P. (2006). Lernen mit Simulationen in *face-to-face* kooperativer Lernumgebung. In: Pitton, A. (Hg.), *Lehren und Lernen mit neuen Medien. Tagungsband zur GDCP, 2005*. Berlin: LIT Verlag, 45-47.
- TAJMEL, T. (2009a). *Skriptum zur Lehrveranstaltung "Grundlagen der DaZ-Förderung in der Schule"*. Humboldt-Universität zu Berlin.
- TAJMEL, T. (2009b). *Bildungssprache in den mathematisch-naturwissenschaftlichen Fächern*. Dokumentation zur Fachtagung „Bilanz und Perspektiven von FörMig Sachsen“, 10. September 2009 in Dresden, 9-36.
- TERGAN, S.-O. (1997). Conceptual and methodological shortcomings in hypertext/hypermedia design and research. *Journal of Educational Computing Research*, 16 (3), 209-235.
- TERGAN, S.-O. (2002). Hypertext und Hypermedia: Konzeption, Lernmöglichkeiten, Lernprobleme und Perspektiven. In: Issing, L.J., Klimsa, P. (Hg.), *Information und Lernen mit Multimedia und Internet. Lehrbuch für Studium und Praxis*. Weinheim: Beltz-PVU, 99-110.
- TIPLER, P.A. (1994; 3.Auflage, 2000). *Physik*. Heidelberg-Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.

- TVERSKY, B., MORRISON, J.B., BÉTRANCOURT, M. (2002). Animation: can it facilitate? *Human-Computer Studies*, 57, 247-262.
- ULLSPERGER, M., CRAMON, D.Y. von (2006). Funktion frontaler Strukturen. In: Karnath, H.-O., Thier, P. (Hg.), *Neuropsychologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 479-487.
- URHAHNE, D., PRENZEL, M., DAVIER, M. von, SENKBEIL, M., BLESCHKE, M. (2000). Computereinsatz im naturwissenschaftlichen Unterricht – Ein Überblick über die pädagogisch-psychologischen Grundlagen und ihre Anwendung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 6, 157-186
- VOSNIADOU, S. (1999). Conceptual change research: State of the art and future directions. In: Schnotz, W., Vosniadou, S., Carretero, M. (Hg.), *New Perspectives on Conceptual Change*. Amsterdam u.a.: Elsevier, 3-13.
- VOSNIADOU, S. (2001). Conceptual Change Research and the Teaching of Science. In: Behrendt, H. et al. (Hg.), *Research in Science Education – Past, Present, and Future*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 177-188.
- WAGENSCHHEIN, M. (1967). Natur und Apparatur. Einleitendes zur Didaktik der Wellenlehre des Lichtes. *Zeitschrift MNU*, 20 (3), 109-112.
- WAGENSCHHEIN, M. (1988). Die Sprache im Physikunterricht (1968). In: Berg, C. (Hg.), *Naturphänomene sehen und verstehen. Genetische Lehrgänge*. Stuttgart: Ernst Klett Verlag, 133-148.
- WALLACE, C.S., HAND, B., PRAIN, V. (2004). *Writing and Learning in the Science Classroom*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- WEIDENMANN, B. (1988). *Psychische Prozesse beim Verstehen von Bildern*. Bern, Stuttgart, Toronto: Verlag Hans Huber.
- WEIDENMANN, B. (1993). *Instruktionsmedien*. Arbeiten zur Empirischen Pädagogik und Pädagogischen Psychologie, Nr.27. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München, Institut für Erziehungswissenschaften und Pädagogische Psychologie.
- WEIDENMANN, B. (1994, 3. Auflage). Psychologie des Lernens mit Medien. In: Weidenmann, B., Krapp, A., Hofer, M., Huber, G. L., Mandl, H. (Hg.), *Pädagogische Psychologie*. München – Weinheim: Psychologie Verlags Union, Urban & Schwarzenberg, 493-554.
- WEIDENMANN, B. (2002). Multicodierung und Multimodalität im Lernprozess. In: Issing, L.J., Klimsa, P. (Hg.), *Information und Lernen mit Multimedia und Internet. Lehrbuch für Studium und Praxis*. Weinheim: Beltz-PVU, 45-62.

- WEINERT, F.E., HELMKE, A. (1995). Learning from wise mother nature or big brother instructor: The wrong choice as seen from an educational perspective. *Educational Psychologist*, 30, 135-142.
- WELLINGTON, J., OSBORNE, J. (2001). *Language and literacy in science education*. Buckingham, Philadelphia: Open University Press.
- WICKIHALTER, R. (1984). Schülervorstellungen zum Sehen. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie (NiU-P/C)*, 32 (2), 73-77.
- WIDODO, A., DUIT, R. (2005). Konstruktivistische Lehr-Lern-Sequenzen und die Praxis des Physikunterrichts. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 11, 131-146.
- WIESNER, H. (1986). Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten im Bereich der Optik. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie*, 34 (13), 123-127.
- WIESNER, H. (1995). Physikunterricht – an Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten orientiert. *Unterrichtswissenschaft*, 23, 127-145.
- WIESNER, H., ENGELHARDT, P. (1987). Einführung in die Optik. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie*, 35 (29), 380-384.
- WILD, E., HOFER, M. & PEKRUN, R. (2006, 5. Auflage). Psychologie des Lerner. In: Krapp, A., Weidenmann, B. (Hg.), *Pädagogische Psychologie*. Weinheim, Basel: Beltz Verlag, 203-265.
- WILDE, K.D., HIPPER, H. & MERZENICH, M. (2002). Web Usage Mining. *WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 31 (2), 105-110.
- WIMBER, F. (1997). Ein Bild sagt mehr als tausend Worte ... – Zeichnungen enthüllen Vorstellungen, Einstellungen, Weltbilder. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 38, 30-32.
- WIRTH, J., KLIEME, E. (2002). Computer literacy im Vergleich zwischen Nationen, Schulformen und Geschlechtern. *Unterrichtswissenschaft*, 30 (2), 136-157.
- WODZINSKI, R. (2007, 2. Auflage). Mädchen im Physikunterricht. In: Kircher, E., Schneider, W. (Hg.), *Physikdidaktik in der Praxis*. Berlin: Springer Verlag, 559-580.
- WÜNSCHER, T. (2004). Lernen mit Co-Lab. In: Pitton, A. (Hg.), *Chemie- und physikdidaktische Forschung und naturwissenschaftliche Bildung. Tagungsband zur GDGP, 2003*. Münster: LIT Verlag, 96-98.

ZANDER, S., BRÜNKEN, R. (2006). Lernen mit Neuen Medien in den Naturwissenschaften. In: Pitton, A. (Hg.), *Lehren und Lernen mit neuen Medien. Tagungsband zur GDCP, 2005*. Berlin: LIT Verlag, 15-17.

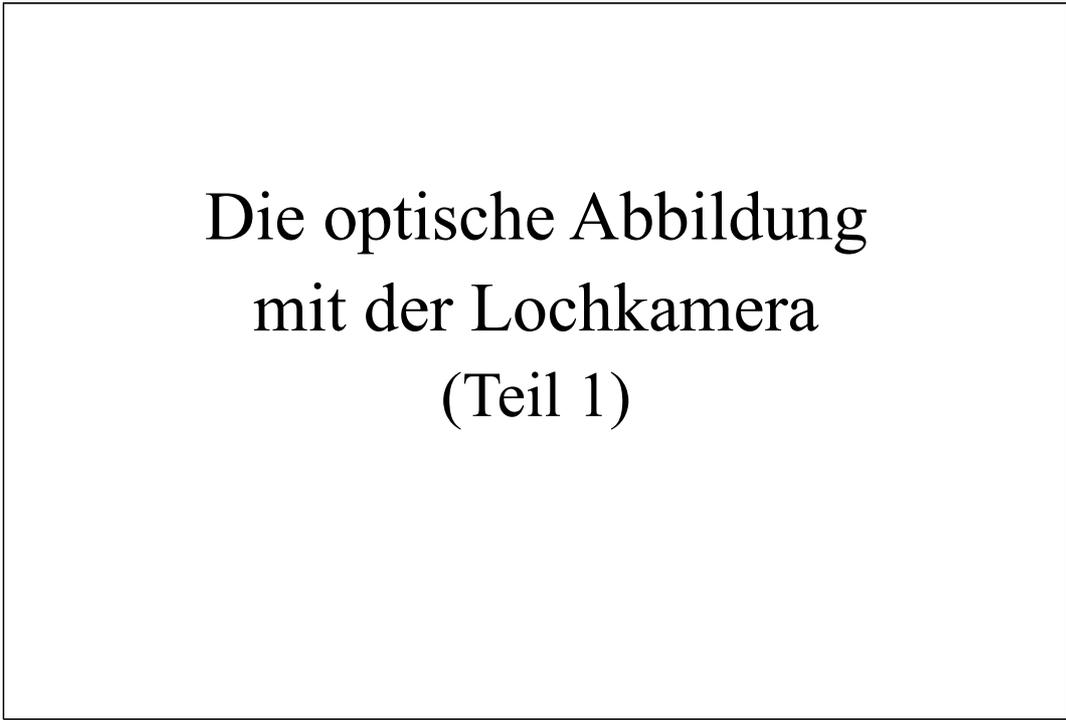
ZASTROW, M.U. (2001). *Interaktive Experimentieranleitungen*. Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes zur Vorbereitung auf das Experimentieren mit Messgeräten im Physikalische. Berlin: Logos Verlag.

ZWERINA, H. (1988). Masken und Formulare. In: Balzert, H. et al. (Hg.), *Einführung in die Software-Ergonomie*. Berlin, New York, 163-174.

Anhang

A Die Bildversion des Lernprogramms

A.1 Erster Teil des Lernprogramms



**Die optische Abbildung
mit der Lochkamera
(Teil 1)**

I/S.1

Wie funktioniert eine Lochkamera?

Du wirst jetzt gleich mit einem Lernprogramm arbeiten, das an der Universität Potsdam entwickelt wurde. Wir wollen dir in diesem Programm erklären, was eine optische Abbildung ist.

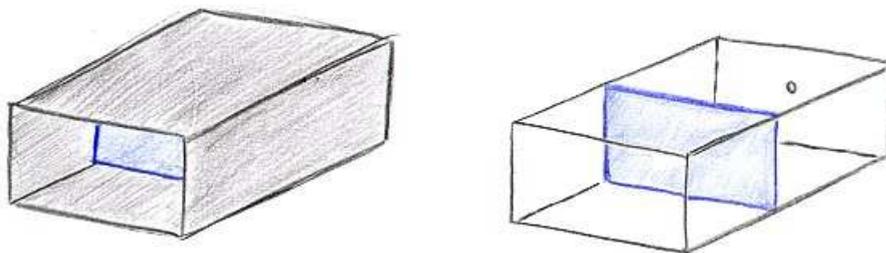
Ich bin sicher, dass du schon etwas über die optische Abbildung weißt. Ich schlage vor, dass wir uns ihr trotzdem erst einmal Schritt für Schritt nähern.

Wir wollen die optische Abbildung an einem Beispiel kennen lernen: Anhand der Lochkamera. Die Lochkamera ist das einfachste Gerät, mit dem wir eine optische Abbildung machen können.

I/S.2

Wir fragen also: Wie sieht eine Lochkamera aus?

Eine Lochkamera ist ein Kasten, zum Beispiel ein Schuhkarton oder eine andere Schachtel. In einer der beiden kleineren Seiten ist ein kleines Loch. Auf der Seite gegenüber dem Loch sitzt die Mattscheibe.



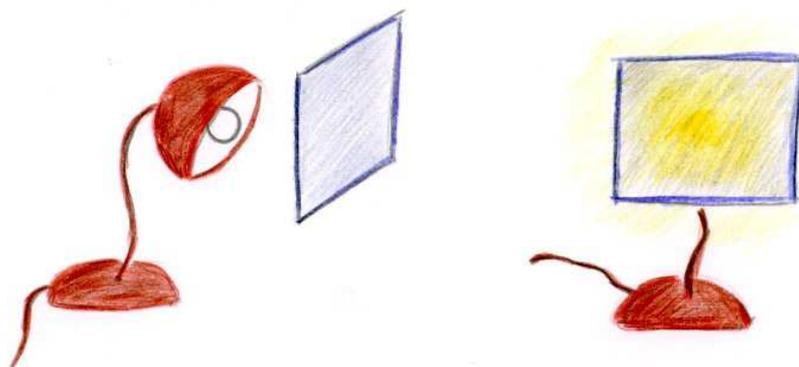
I/S.3

Eine Mattscheibe ist ein flacher Gegenstand, der fast durchsichtig ist, aber durch den man nicht direkt schauen kann. Wir können zum Beispiel Butterbrot- oder Pergamentpapier als Mattscheibe nehmen.



I/S.4

Wenn du die Mattscheibe vor eine Lampe hältst, so erscheint sie hell. Du siehst, dass Licht von der Lampe kommt, aber die Lampe selbst kannst du nicht mehr sehen.



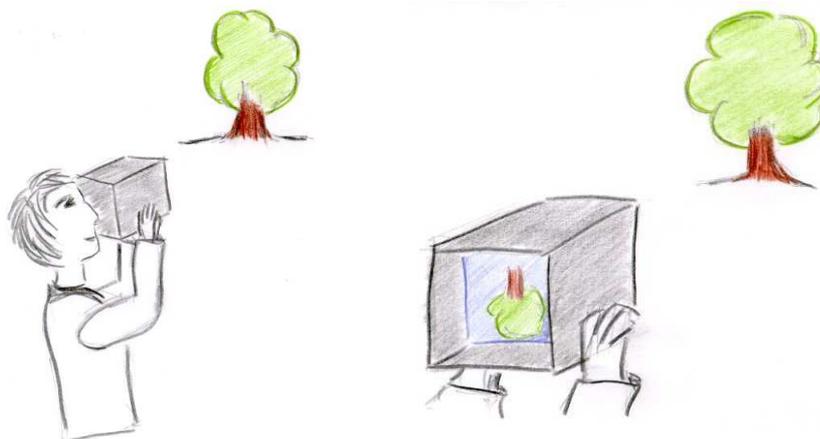
I/S.5

Jetzt kannst du den Kasten in die Hand nehmen und die Lochseite auf einen Baum richten.
Was siehst du, wenn du die Mattscheibe betrachtest?



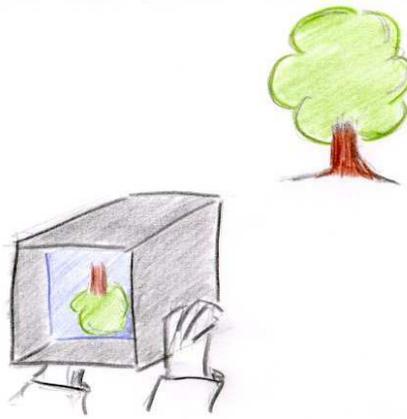
I/S.6

Auf der Mattscheibe erscheint ein Bild des Baumes. Aber das Bild ist nicht so, wie du es vielleicht erwartest: Der Baum steht auf dem Kopf. Und auf dem Bild ist alles kleiner als in der wirklichen Landschaft.
Wenn wir Bilder von Gegenständen auf einer Mattscheibe auffangen können, dann sagen wir, dass eine optische Abbildung stattfindet.



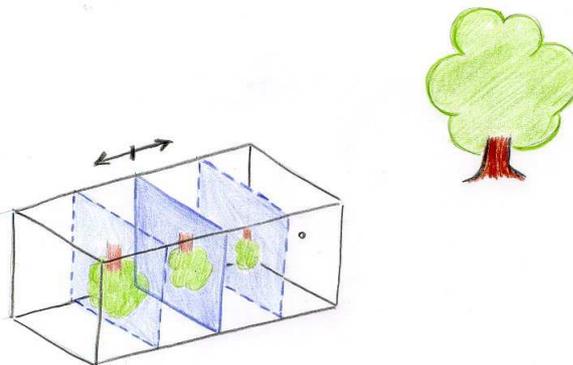
I/S.7

Wie verändert sich das Bild, wenn du die Mattscheibe nach vorne oder nach hinten schiebst?



I/S.8

Schieben wir die Mattscheibe zum Loch hin: Das Bild wird kleiner. Und jetzt in die andere Richtung: Das Bild wird größer. Dabei verändert sich die Position des Gegenstandes nicht. Das Bild des Gegenstandes ist umso größer, je weiter die Mattscheibe vom Loch entfernt ist.

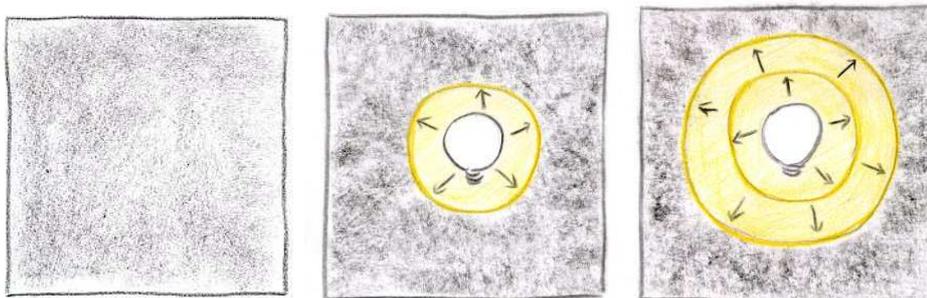


I/S.9

Wir kommen gleich zum wichtigen Teil des Lernprogramms. Dort wollen wir erklären, wie das Bild auf der Mattscheibe entsteht. Dazu müssen wir eine der Eigenschaften des Lichtes kennen: Wir müssen wissen, dass sich Licht geradlinig ausbreitet. Was heißt das?

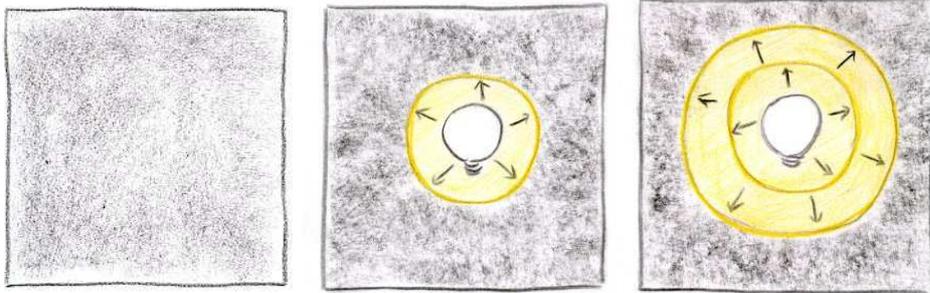
I/S.10

Von einer Lichtquelle breitet sich das Licht in alle Richtungen aus. Wir wählen eine Richtung und fragen: Was macht das Licht? Das Licht bewegt sich immer weiter geradeaus in diese Richtung, wenn es nicht durch einen Gegenstand daran gehindert wird. Das heißt geradlinig.



I/S.11

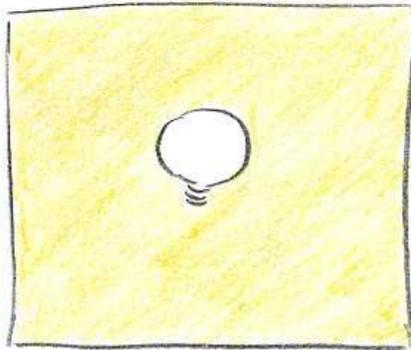
Das Licht bewegt sich dabei sehr schnell. Rasend schnell. Und für unsere Wahrnehmung ist das Licht zu schnell: es scheint sofort überall zu sein. Eine überraschende Einsicht der Physiker war es, dass es keinen Gegenstand im Universum gibt, der schneller als Licht fliegen kann.



I/S.12

Wir wollen jetzt in Gedanken das Licht zerlegen. Aber was soll das heißen, Licht zerlegen? Licht ist schließlich keine Torte, die in einzelne Stücke geschnitten werden kann.

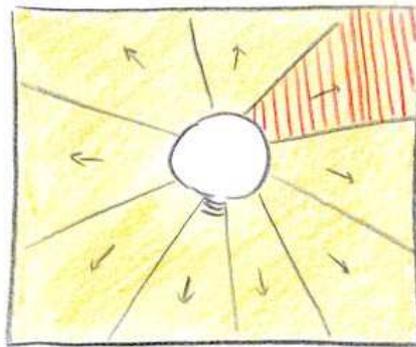
Die Physikerinnen und Physiker meinen etwas anderes damit. Schauen wir uns noch einmal die Lampe an.



I/S.13

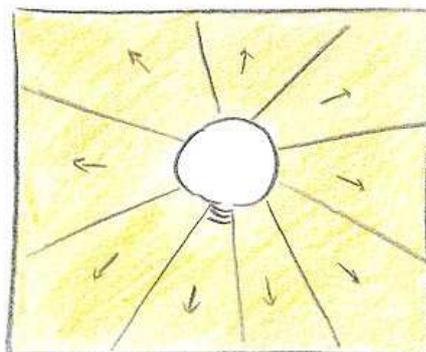
Das Licht breitet sich in alle Richtungen aus. Wir denken uns einzelne Abschnitte und betrachten immer nur einen davon. So wird das Licht in Abschnitte zerlegt.

Jeder Abschnitt sieht wie ein Trichter aus. Er wird immer breiter. Die Physikerinnen und Physiker nennen einen solchen Trichter auch Lichtbündel.



I/S.14

Diese Zerlegung des Lichts ist nur ein erster Versuch. Sie ist nur unter ganz bestimmten Bedingungen richtig. Bei den meisten Lichtquellen lässt sich das Licht nicht so eindeutig zerlegen, wie es die Zeichnung darstellt. Aber diese Frage beantworten wir gleich.



I/S.15

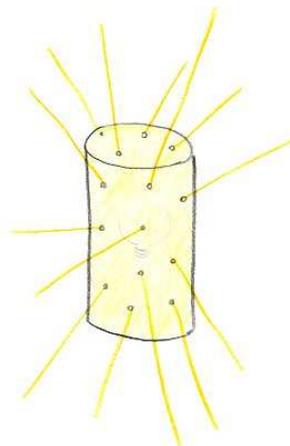
Was wir dazu noch genauer verstehen müssen, sind die Worte dünnes Lichtbündel und Punktlichtquelle. Unter einem dünnen Lichtbündel oder einer Punktlichtquelle stellt sich jeder etwas anderes vor. In der Physik jedoch wird die Bedeutung von Worten genau festgelegt. Das ist anders als in der Alltagssprache.

Wir wollen zuerst die Bedeutung und anschließend die Verwendung von dünnen Lichtbündeln kennen lernen.

Dazu fragen wir: Wie werden Lichtbündel hergestellt, die sich nicht verbreitern?

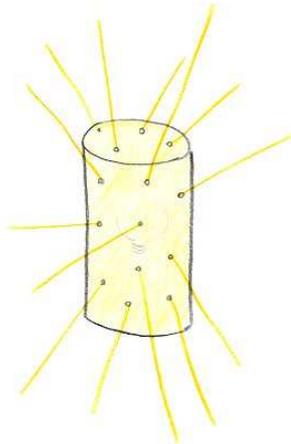
I/S.16

Es reicht erst einmal aus, mit Hilfe von so genannten Blenden nur einen Teil des Lichtes zu verwenden, um solche Lichtbündel herzustellen. Eine Blende ist ein Gegenstand, der das Licht nur an einer kleinen Öffnung durchlässt oder auch an mehreren Öffnungen.



I/S.17

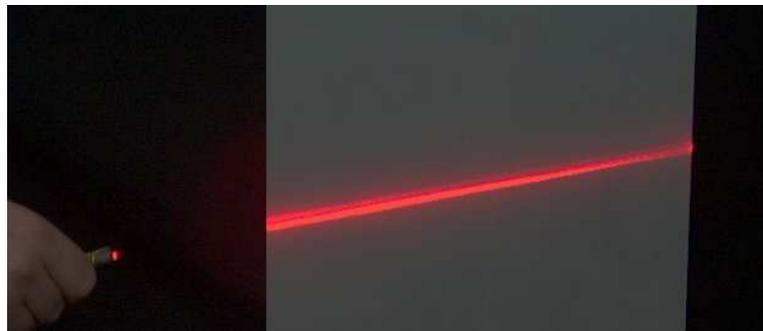
Die Lichtbündel die hinter den Blenden entstehen, laufen auch trichterförmig auseinander – allerdings nur sehr wenig, wenn das Loch klein ist. Man kann deshalb sagen: Das Lichtbündel verbreitert sich nicht, wenn eine Strecke von der Länge eines Meters betrachtet wird.



I/S.18

Eine Lichtquelle, die Lichtbündel herstellt, die fast nicht auseinander laufen, kann jeder kaufen: Einen Laserpointer. Über große Entfernungen ändert sich daher der Durchmesser des Lichtbündels aus dem Laserpointer nicht.

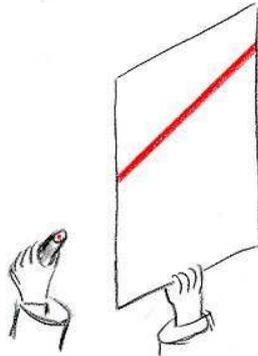
So ein Laserpointer sieht so ähnlich aus wie ein Kugelschreiber. Sein Licht kannst du nur sehen, wenn es zum Beispiel eine Wand oder einen Tisch streift.



I/S.19

Auch wenn die Lichtbündel auseinander laufen, können wir sie in Gedanken in dünne Lichtbündel zerlegen. Dünne Lichtbündel werden als schmale bunte Linien gezeichnet.

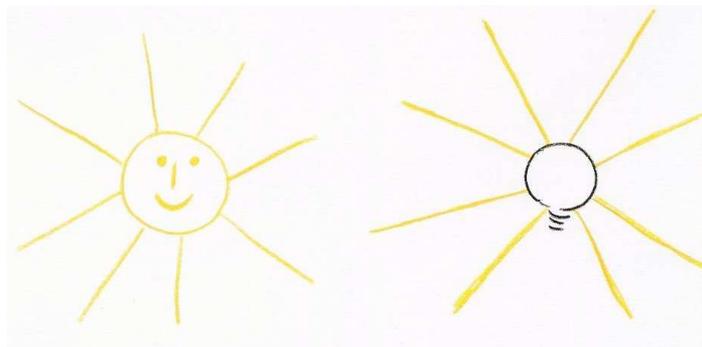
Du wirst noch sehen, dass diese gedankliche Zerlegung nützlich ist. Aber du wirst auch sehen, dass diese gedankliche Zerlegung zu Sichtweisen führt, die über die Alltagsvorstellung hinausgehen.



I/S.20

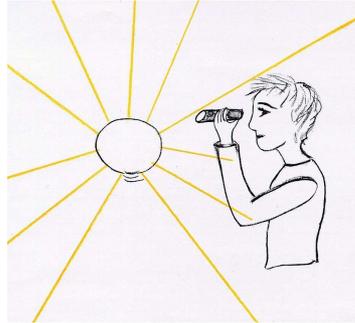
Beginnen wir mit einer Glühlampe. Wie breitet sich das Licht von einer Glühlampe aus?

Vielleicht wirst du sagen, das ist doch ganz einfach. Zeichne die dünnen Lichtbündel so ein, wie kleine Kinder Sonnenstrahlen einzeichnen.



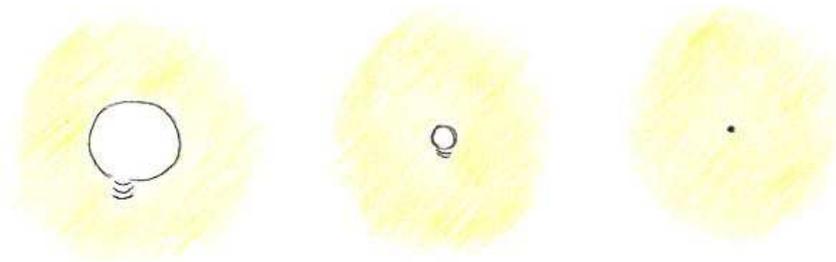
I/S.21

Aber stimmt dieses Bild der Sonnenstrahlen mit den Beobachtungen überein? Physikerinnen und Physiker fragen sehr genau nach. Sie könnten dich bitten, mit einer Pappröhre auf den Rand einer Glühlampe zu sehen. Nimm an, dass du dabei die Pappröhre schräg zu allen gelben Linien hältst. Keine dieser gelben Linien gelangt in die Pappröhre. Du könntest die Lampe durch die Pappröhre also gar nicht sehen. Du siehst sie aber. Etwas stimmt nicht an dem einfachen Bild.



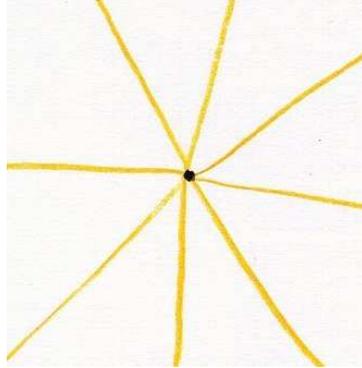
I/S.22

Um zu verstehen, wie Licht auch schräg in die Pappröhre fällt, wenden wir einen Trick an: Wir machen die Glühlampe immer kleiner. So klein, dass du sie fast nicht mehr erkennen kannst. Die Glühlampe ist zu einem Fleck geschrumpft.



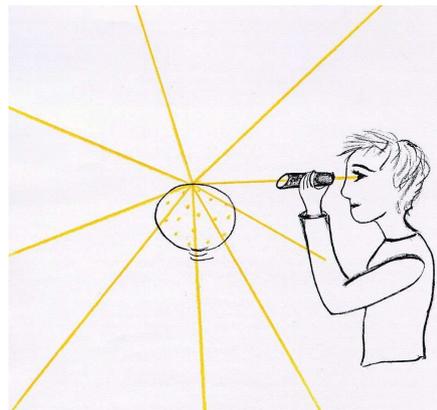
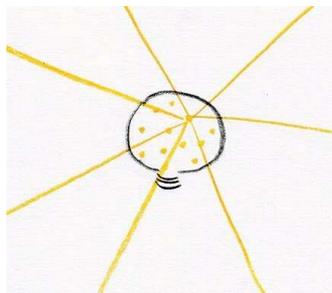
I/S.23

In welche Richtungen wird sich das Licht von einem ganz kleinen Fleck ausbreiten? Die Antwort lautet: in alle Richtungen. Wir könnten das durch unendlich viele dünne Lichtbündel darstellen. Weil wir nicht alle dünnen Lichtbündel zeichnen können, haben wir nur einige ausgewählt.



I/S.24

Wir zerlegen jetzt die Lampe in viele kleine Lichtquellen, in Flecken. Von jedem Fleck zeichnen wir dann dünne Lichtbündel in alle Richtungen ein. Jetzt kannst du auch verstehen, dass es egal ist, wie du mit deiner Pappröhre auf die Lampe siehst. Es gibt immer Lichtbündel, die sich in Richtung der Pappröhre ausbreiten.



I/S.25

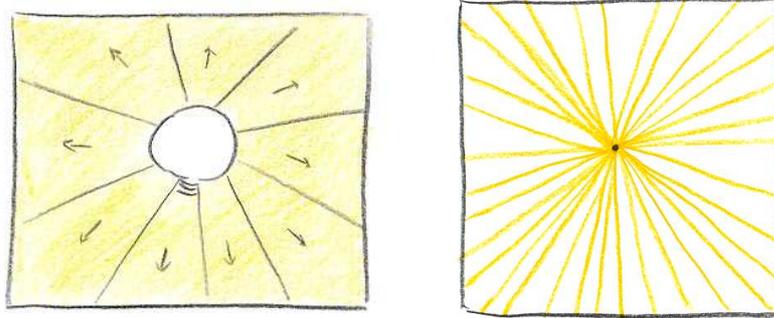
In der Physik heißt eine Lichtquelle, die aus einem kleinen Fleck besteht, Punktlichtquelle. Eigentlich müsste sie Flecklichtquelle heißen. Aber dieser Name ist nicht gebräuchlich.

Wir wollen in diesem Lernprogramm auch nur von Lichtbündeln sprechen. Das Wort Lichtstrahl oder Strahl wollen wir erst einmal vermeiden, weil es in der Alltagssprache zu viele Bedeutungen hat.

I/S.26

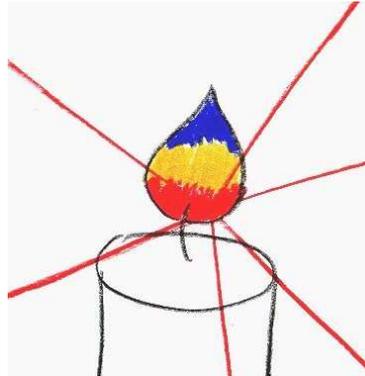
Wir können also in Gedanken jede Lichtquelle in Punktlichtquellen zerlegen. Von jeder Punktlichtquelle gehen unendlich viele dünne Lichtbündel in alle Richtungen aus. Diese Überlegung ist physikalisch fast immer zutreffend.

Erinnerst du dich noch an die erste Zerlegung, an die trichterförmigen Lichtbündel? Wir haben bei dieser Zerlegung so getan, als ob die Glühlampe eine Punktlichtquelle ist. Wenn du dir die Glühlampe als Punkt denkst, dann zeigt das Bild das Richtige.



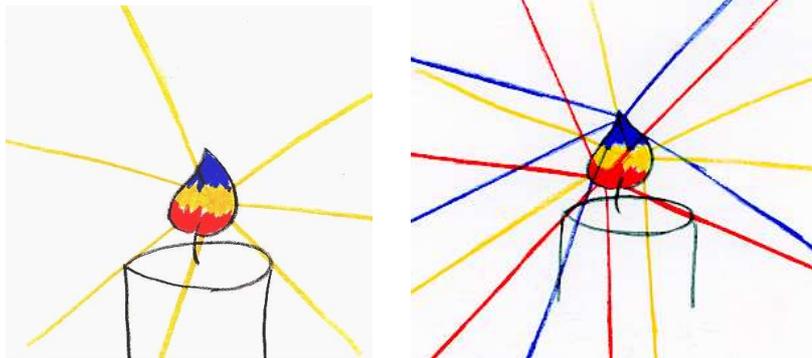
I/S.27

Wir zerlegen jetzt eine Kerzenflamme. Die Farben der Kerzenflamme sind übertrieben eingezeichnet, um verschiedene Stellen der Flamme deutlich unterscheiden zu können. In Wirklichkeit sind die Farben nicht so getrennt. An jedem Punkt der Kerzenflamme kann man beliebig viele dünne Lichtbündel einzeichnen, die in alle Richtungen gehen. Nehmen wir zuerst eine rote Stelle und zeichnen rote Lichtbündel ein.



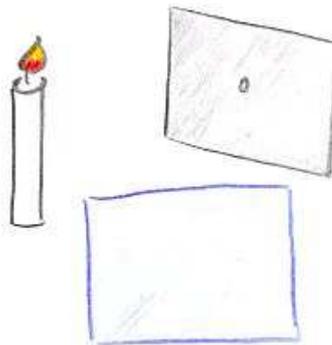
I/S.28

Dann die Lichtbündel von einer gelben Stelle. Und jetzt von einer blauen Stelle. Das Bild wird schnell unübersichtlich.



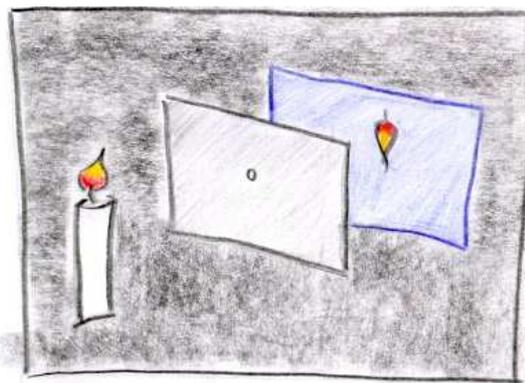
I/S.29

Und nun haben wir alles beisammen, um zu verstehen, wie die optische Abbildung bei einer Lochkamera entsteht. Schauen wir uns an, wie eine Kerzenflamme mit einer Lochkamera abgebildet wird.
Hier sind unsere Kerzenflamme, eine Pappe mit kleinem Loch – also eine Blende – und die Mattscheibe.



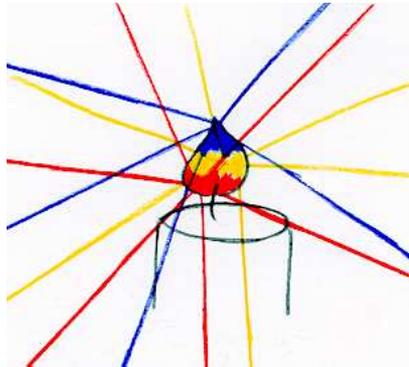
I/S.30

Diese drei Gegenstände stellen wir in einen dunklen Raum und zünden die Kerze an. Auf der Mattscheibe erscheint das Bild der Kerzenflamme.



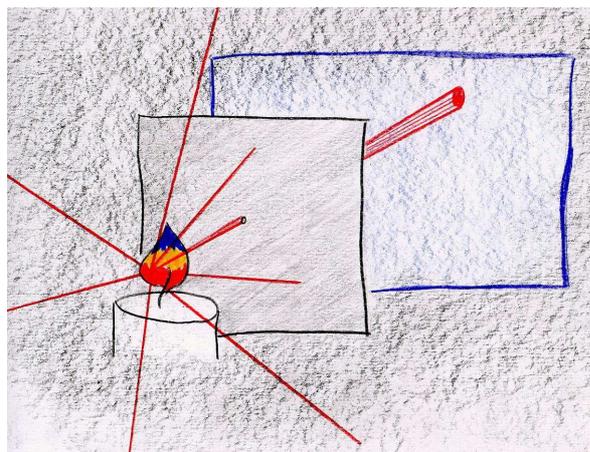
I/S.31

Zerlegen wir die Kerzenflamme noch einmal in Punktlichtquellen. Wie war das noch? Die Kerzenflamme wird in einzelne Punkte zerlegt, von denen dann dünne Lichtbündel in alle Richtungen ausgehen.



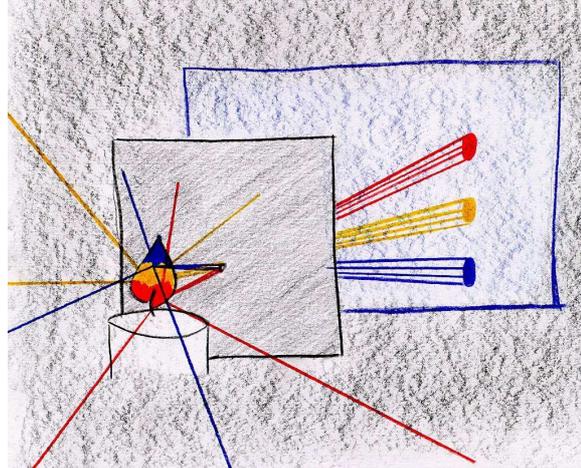
I/S.32

Wo kommen die Lichtbündel an?
Von der roten Stelle kommen die rot gezeichneten dünnen Lichtbündel.
Das Loch lässt nur wenige der roten Lichtbündel durch, die auf die Mattscheibe treffen.



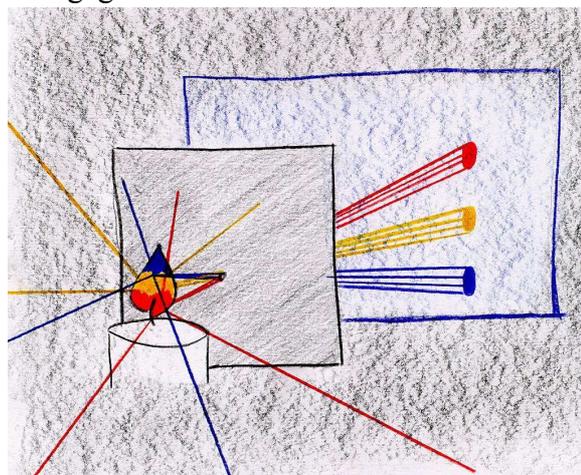
I/S.33

Von den gelb und blau gezeichneten dünnen Lichtbündeln passieren auch nur wenige das Loch. Das geschieht natürlich nicht hintereinander, sondern im gleichen Augenblick.



I/S.34

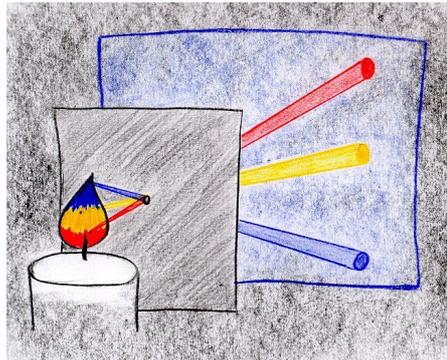
Was macht die Pappe mit ihrem Loch? Das Loch sortiert dünne Lichtbündel. Und die Pappe verhindert, dass andere Lichtbündel auf die Mattscheibe gelangen können. Das Loch lässt Licht durch, und kommt das Licht auf der Mattscheibe an, so können wir einen kleinen Lichtfleck sehen. Die schwarze Pappe hingegen nimmt Licht auf.



I/S.35

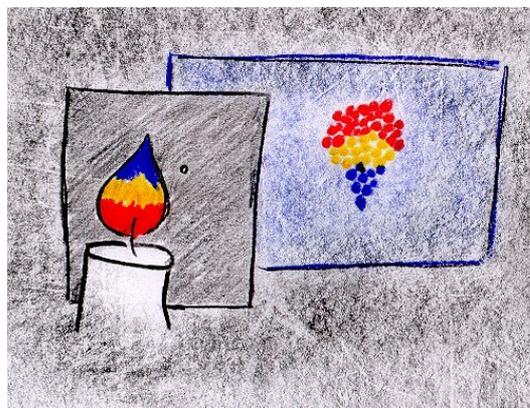
Wie entsteht das Bild? Wir zeichnen nur das Licht ein, das von einem Punkt aus durch das Loch gelangen kann. Die dünnen Lichtbündel fassen wir zu einem großen Lichtbündel zusammen.

Licht von der roten Stelle... das Loch lässt nur einen Teil des Lichtes durch. Auf der Mattscheibe zeigt sich ein roter Fleck. Licht von der gelben Stelle... das Loch lässt nur einen Teil des Lichtes durch. Auf der Mattscheibe zeigt sich ein gelber Fleck. Licht von der blauen Stelle... mit einem blauen Fleck.



I/S.36

Du weißt jetzt schon, wie es weitergeht. Wir machen das für jede Stelle der Kerzenflamme. Die Lichtbündel zwischen Kerzenflamme und Bild lassen wir in unserer Skizze weg. Aus den einzelnen kleinen Lichtflecken setzt sich das Bild der Kerze zusammen. Das Bild steht, wie wir schon gesehen haben, auf dem Kopf.

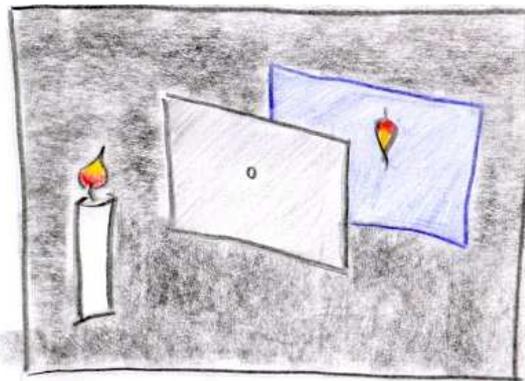


I/S.37

Ich habe euch damit erklärt, wie die optische Abbildung funktioniert.
Erstens: Von einer Lichtquelle breitet sich Licht kreuz und quer in alle Richtungen aus. Wir beschreiben das Licht durch viele dünne Lichtbündel oder durch dicke Lichtbündel.
Zweitens: Das Loch sortiert das Licht. Von jeder Punktlichtquelle können durch das Loch nur ausgewählte dünne Lichtbündel fallen.
Drittens: Die einzelnen Lichtflecken überlagern sich auf der Mattscheibe zu einem Bild.

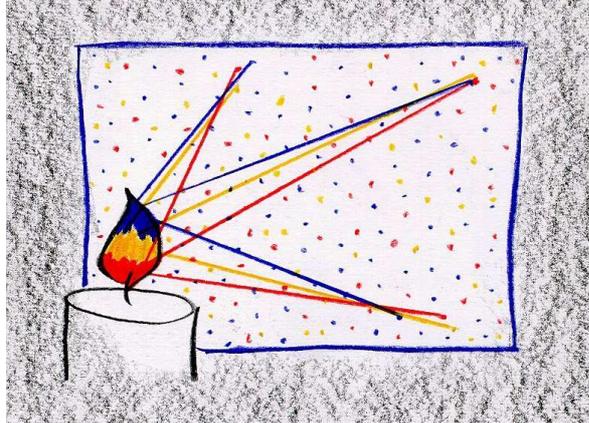
I/S.38

Betrachten wir zum Schluss die optische Abbildung an der Lochkamera mit einer anderen Frage: Was wird geschehen, wenn die Blende in der Lochkamera entfernt wird?



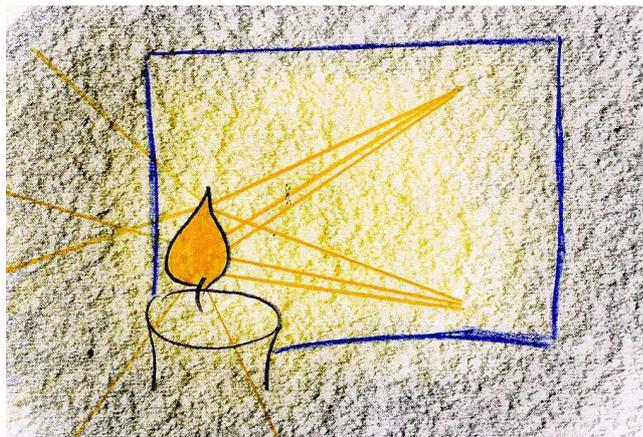
I/S.39

Entfernen wir also die Pappe mit dem Loch. Das Bild verschwindet. Betrachten wir die Mattscheibe, so erkennen wir, dass jetzt auf jede Stelle von allen Punkten, in die wir die Kerze zerlegt haben, Licht gelangt. Ein buntes Muster entsteht. Das Loch ist weg und kann die dünnen Lichtbündel nicht mehr sortieren.



I/S.40

Betrachtet man eine wirkliche Kerzenflamme, so dürfen die Farben nicht so übertrieben gezeichnet werden. In der Kerzenflamme überwiegt das gelbe Licht und die Mattscheibe wird gelblich hell, wenn die Blende entfernt wird.



I/S.41

Ende

I/S.42

A.2 Zweiter Teil des Lernprogramms

**Die optische Abbildung
mit der Lochkamera
(Teil 2)**

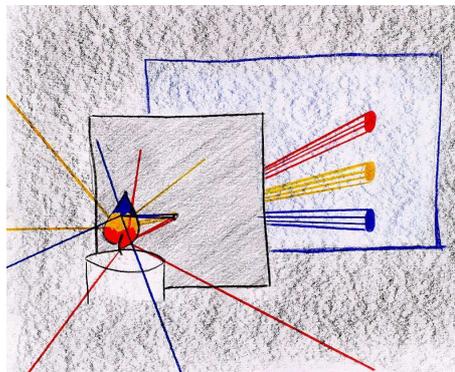
II/S.1

Wie kann man mit einer Lochkamera gute Bilder herstellen?

Im ersten Teil des Lernprogramms hast du erfahren, wie du mit Hilfe eines Loches ein Bild einer Kerzenflamme oder einer Landschaft herstellen kannst.

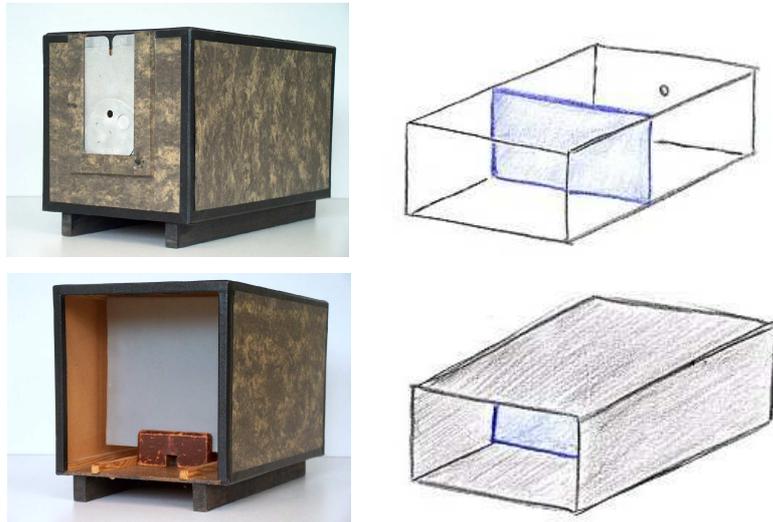
II/S.2

Erinnern wir uns noch einmal daran: Von der Kerzenflamme breitet sich Licht aus. Wir zerlegen die Kerzenflamme in Punktlichtquellen. Von jeder Punktlichtquelle lässt das Loch nur einen kleinen Teil des Lichtes durch – wir sagen, die Blende sortiert dünne Lichtbündel. Oder auch: Das Loch stellt dicke Lichtbündel her. Auf der Mattscheibe zeigt sich ein kleiner Lichtfleck, der die gleiche Form wie die Blendenöffnung hat. Die Lichtflecke vereinigen sich zu einem Bild.



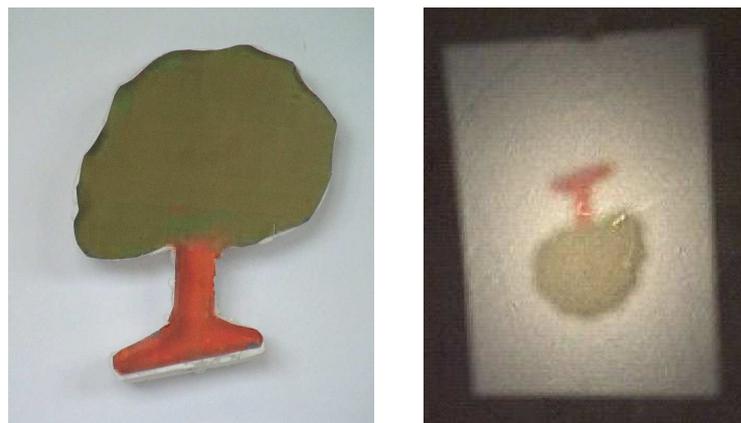
II/S.3

Bisher hast du nur anhand von Zeichnungen gesehen wie mit dem Loch Bilder entstehen. Schauen wir uns eine richtige Lochkamera an. Und dann, auf den nächsten Seiten, wollen wir Bilder betrachten, die mit der Lochkamera aufgenommen wurden.



II/S.4

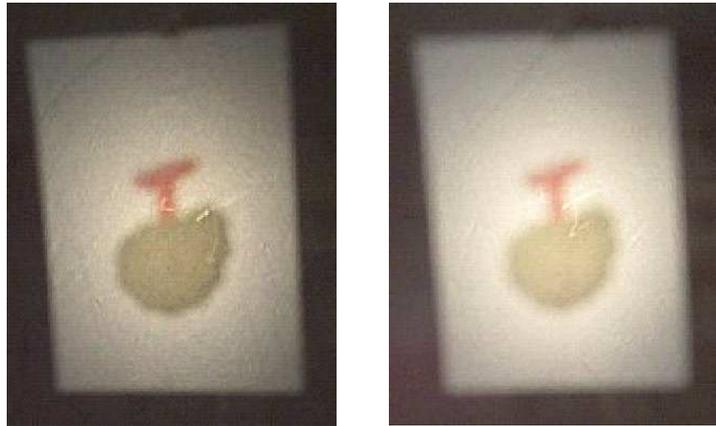
Hier siehst du den Gegenstand, einen Baum. Und das Bild des Baumes, das mit der Lochkamera aufgenommen wurde.



II/S.5

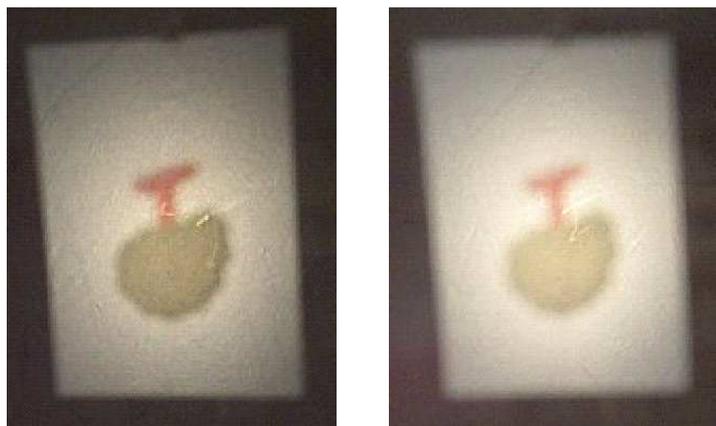
Wie verändert sich das Bild, wenn die Größe des Loches verändert wird?
Zuerst vergrößern wir das Loch. Das Bild wird heller. Und, das Bild wird unschärfer.

Wie können wir diese beiden Beobachtungen erklären?



II/S.6

Das Bild wird heller, weil durch ein großes Loch mehr Licht kommt – das Lichtbündel ist einfach dicker, und damit fällt mehr Licht auf die Mattscheibe. Aber warum wird es unschärfer?



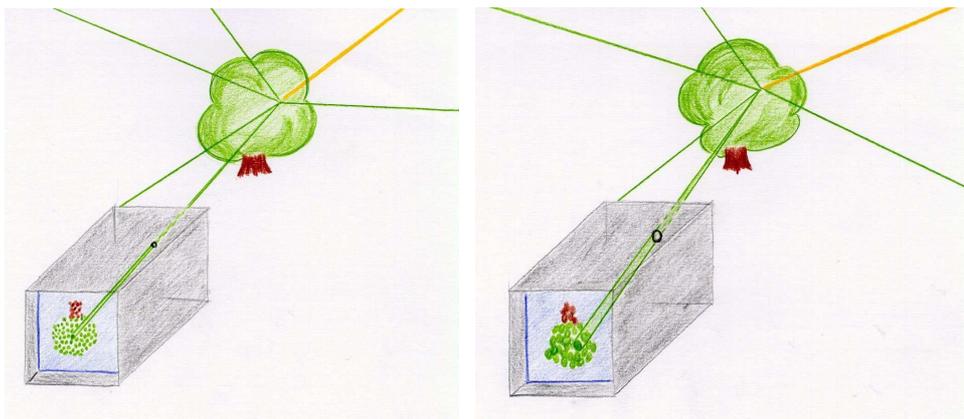
II/S.7

Das Bild ist, wie wir gesehen haben, aus vielen kleinen Lichtflecken aufgebaut. Auch jedes gedruckte Bild ist aus einzelnen Punkten aufgebaut. Wir schauen uns ein Bild und eine Vergrößerung einer Stelle des Bildes an.



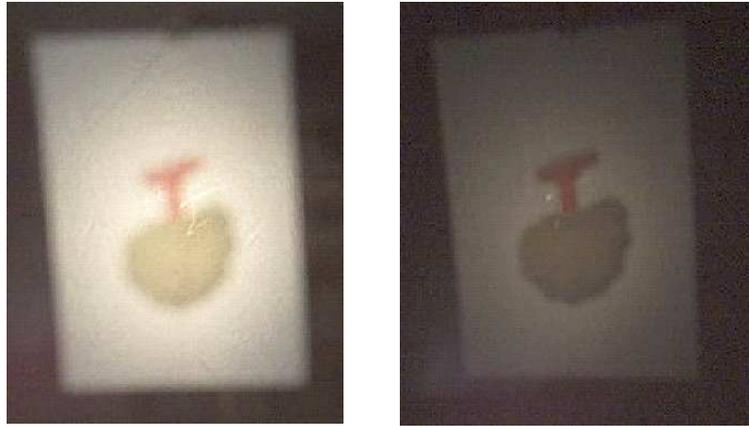
II/S.8

Stell dir jetzt vor, dass die Lichtflecken größer werden. Das passiert, wenn das Loch größer und damit die Lichtbündel breiter werden. Die Lichtflecke überlagern sich. Jetzt kannst du nicht mehr so richtig zwischen den einzelnen Lichtflecken unterscheiden. Das Bild wird unschärfer.



II/S.9

Was geschieht, wenn das Loch kleiner wird? Das Bild wird schärfer.
Und das Bild wird dunkler.



II/S.10

Wir haben damit erklärt wie sich das Bild verändert, wenn die Größe des Loches der Lochkamera verändert wird.
Jetzt weißt du auch, was in der Überschrift mit den guten Bildern gemeint war. Ein Bild, das bei einer optischen Abbildung entsteht, ist umso besser, je schärfer es ist. Um scharfe Bilder zu erhalten, darf das Loch der Lochkamera nicht allzu groß sein.

II/S.11

Kleine Löcher machen also scharfe Bilder. Allerdings haben kleine Löcher auch einen entscheidenden Nachteil: Die Bilder werden dunkel.



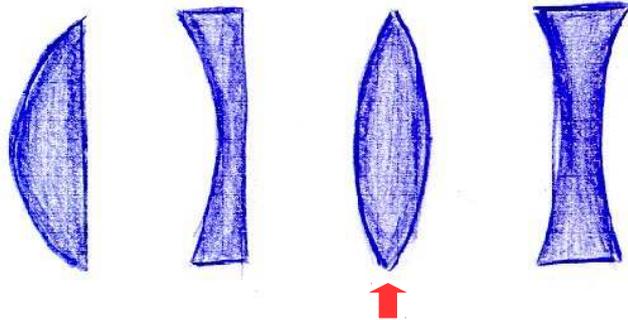
II/S.12

Wie kannst du Bilder herstellen, die gleichzeitig hell und scharf sind? Fotoapparate unterscheiden sich von der Lochkamera für diese Frage in einem wichtigen Bauteil: dem Objektiv. Fotoapparate aller Arten haben ein Objektiv.



II/S.13

Das Objektiv war der wichtigste Schritt von der Lochkamera zum modernen Fotoapparat. Objektive bestehen aus verschiedenen Glasstücken, die sich oft in einer Art Rohr befinden. Diese Glasstücke heißen Linsen. Es gibt verschiedene Arten von Linsen, die sich in der Form unterscheiden. Wir wollen uns im Weiteren nur mit Linsen beschäftigen, die eine bauchige Form haben. Diese Linsen heißen in der Physik bikonvexe Linsen. Für uns kurz: Einfach Linsen.



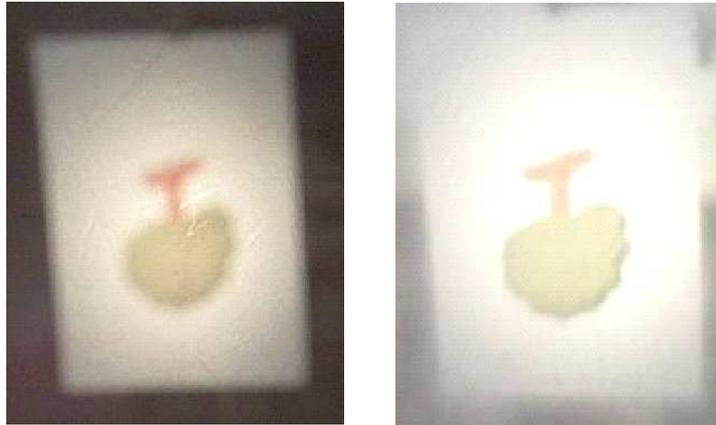
II/S.14

Wir wollen uns zuerst nur ansehen, was auf der Mattscheibe geschieht, wenn man in das Loch eine Linse setzt.



II/S.15

Dazu vergleichen wir zwei Bilder. Das eine Bild wurde mit einer Lochkamera ohne Linse aufgenommen. Das andere Bild wurde mit einer Lochkamera mit Linse aufgenommen. Bei der optischen Abbildung mit der Linse zeigt sich ein scharfes und helles Bild.



II/S.16

Welche Eigenschaften der Linse zu dem schärferen und helleren Bild führen, wollen wir im nächsten und letzten Teil des Lernprogramms erklären. Jetzt beschäftigen wir uns noch mit einer anderen Beobachtung.

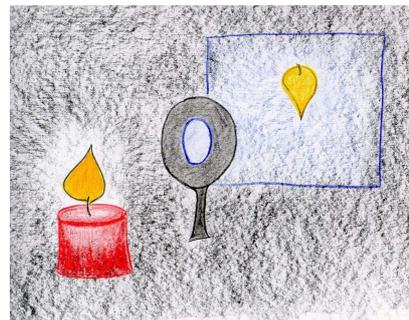
II/S.17

Schauen wir uns dazu ein Bild einer Kerze an, das mit einer Linse hergestellt wurde. Wir brauchen: eine Kerze, eine Linse und eine Mattscheibe. Der Raum wird verdunkelt. Dann können wir den Kasten der Lochkamera weglassen.



II/S.18

Die Kerze wird angezündet. Auf der Mattscheibe siehst du deutlich die Flamme. Aber ein Teil der Kerze ist nicht zu sehen. Was kannst du tun, um auch diesen Teil der Kerze auf die Mattscheibe abzubilden?



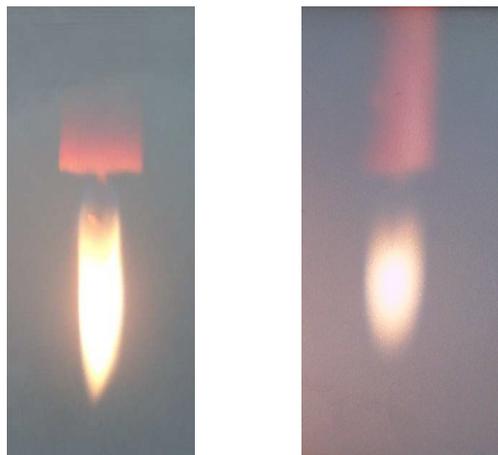
II/S.19

Du kannst die Kerze zusätzlich mit einer Lampe beleuchten. Wir stellen die Lampe dazu so, dass das Licht von der Lampe nicht direkt in die Linse fällt. Auf den ersten Blick ist wieder nur die Flamme zu erkennen.



II/S.20

Sehen wir uns das Bild direkt auf der Mattscheibe an. Zum Vergleich ist ein Bild einer unbeleuchteten Kerze gezeigt. Wir können bei der beleuchteten Kerze das rote Wachs des ganzen Kerzenstumpfes sehen. Wie lässt sich das erklären?

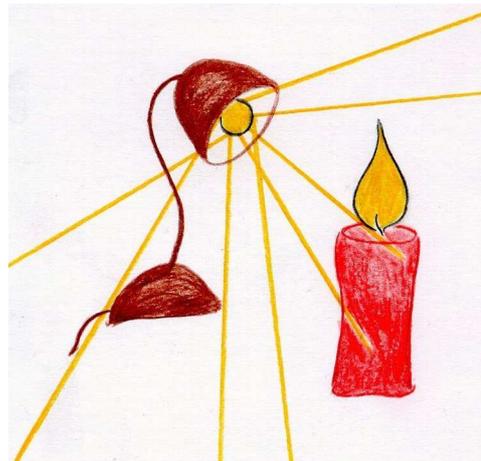


II/S.21

Oberflächlich betrachtet ergibt die Sache keinen rechten Sinn. Die Lampe wird ja so gestellt, dass sich ihr Licht von der Mattscheibe weg bewegt. Wenn du aber weißt, dass fast alle Gegenstände unserer Alltagswelt Licht reflektieren, dann kannst du dir erklären warum das Bild des Kerzenstumpfes erscheint. Der Kerzenstumpf reflektiert das Licht aber anders als ein Spiegel. Aber wie?

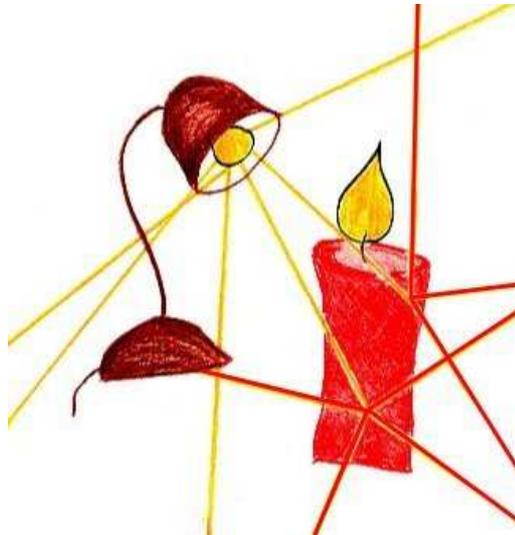
II/S.22

Von der Lampe breitet sich das Licht in Richtung der Kerze aus. Was passiert, wenn das Licht auf den Kerzenstumpf trifft?



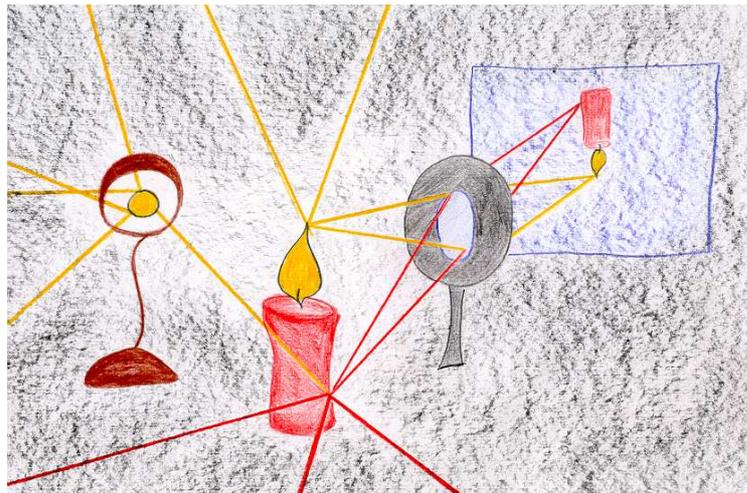
II/S.23

Das Licht breitet sich von jedem Punkt des Kerzenstumpfes in alle Richtungen aus. Die Physikerinnen und Physiker sagen, das Licht wird gestreut.



II/S.24

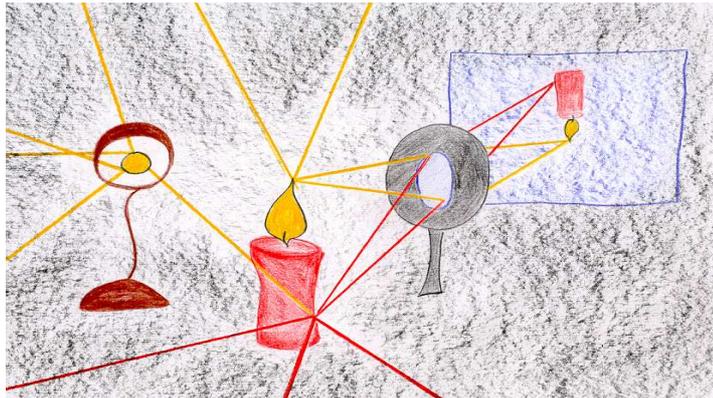
Jetzt gelangt auch Licht von dem Kerzenstumpf durch die Linse. Ohne das Licht von der Lampe wurde vom Stumpf nur wenig oder gar kein Licht gestreut.



II/S.25

Mit der letzten Frage haben wir etwas umständlich ausgedrückt, was jeder weiß: Welchen Rat gibst du, wenn dir jemand ein dunkles Foto zeigt? Das nächste Mal mehr Licht.

Um ein gutes Bild eines Gegenstandes zu erhalten, muss der Gegenstand gut beleuchtet sein. Dann wird das Licht der Lichtquelle vom Gegenstand zum Fotoapparat gestreut.



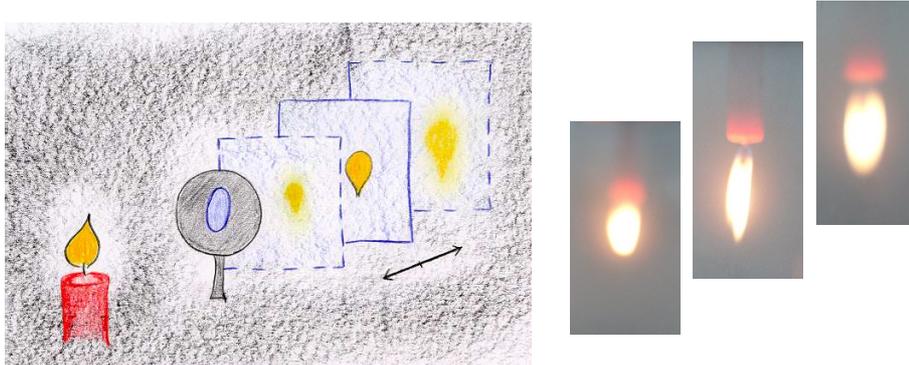
II/S.26

Bevor wir den zweiten Teil des Lernprogramms beenden, stellen wir noch eine letzte Frage: Wie verändert sich das Bild bei der optischen Abbildung mit der Linse, wenn die Mattscheibe hin und her bewegt wird?

II/S.27

Das Bild wird unscharf. Nur bei ganz bestimmten Abständen zwischen Linse und Mattscheibe erscheint auf der Mattscheibe ein scharfes Bild der Kerzenflamme.

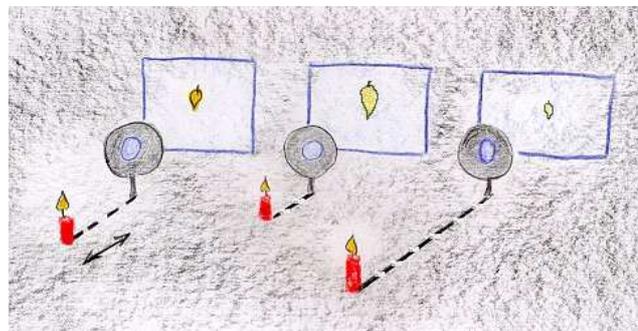
Wie war das noch bei der optischen Abbildung mit dem Loch? Du konntest die Mattscheibe hin- und herrücken, und das Bild blieb scharf.



II/S.28

Was geschieht, wenn du jetzt die Kerze hin und her schiebst? Das Bild wird jeweils auch unscharf.

Wir schließen: Bei der optischen Abbildung mit einer Linse sind der Abstand zwischen Gegenstand und Linse und der Abstand zwischen Linse und Mattscheibe festgelegt, wenn ein scharfes Bild entstehen soll.



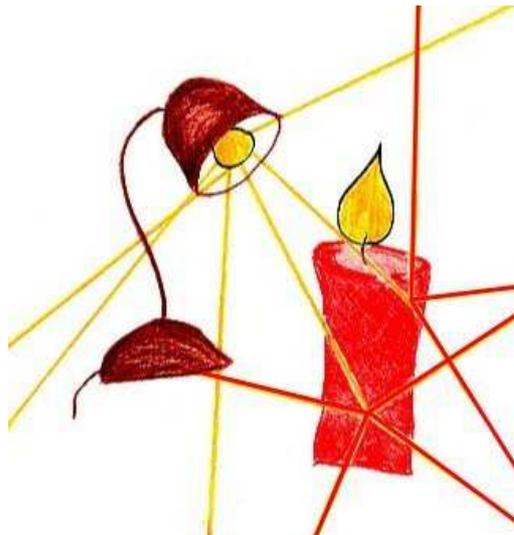
II/S.29

Fassen wir zusammen: Ich habe euch heute gezeigt, was mit dem Bild auf der Mattscheibe geschieht, wenn die Größe des Loches verändert wird. Je kleiner die Öffnung des Loches, desto kleiner die Lichtflecken, desto schärfer wird das Bild. Gleichzeitig wird das Bild dunkel. Offenbar ist es unmöglich mit einem Loch auf der Mattscheibe gleichzeitig ein scharfes und helles Bild zu sehen. Dies gelingt mit einem besonders geformten Stück Glas, einer so genannten Bikonvexlinse.



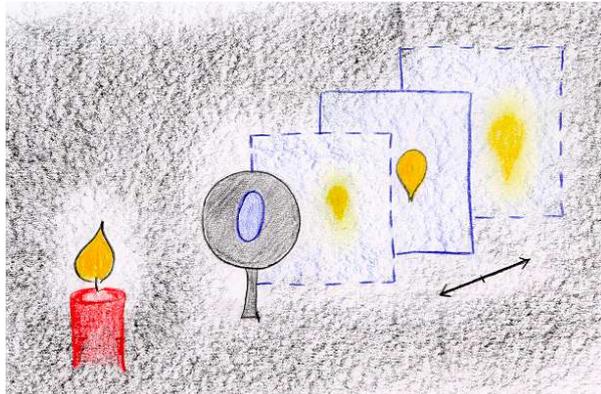
II/S.30

Anschließend haben wir uns überlegt, dass Gegenstände ausreichend beleuchtet sein müssen, damit helle Bilder entstehen. Die Physikerinnen und Physiker sprechen in diesem Zusammenhang von der Streuung des Lichts.



II/S.31

Drittens hatten wir gesehen, dass wir für ein helles und scharfes Bild der Linse gewissermaßen einen Preis zahlen müssen. Bei der optischen Abbildung mit der Linse sind die Abstände zwischen Linse und Bild, und zwischen Gegenstand und Linse festgelegt. Eine genaue Untersuchung wird zeigen, dass diese Aussage noch eingeschränkt werden muss.



II/S.32

Im dritten und letzten Teil des Lernprogramms werden wir besprechen, wie die optische Abbildung einer Linse funktioniert und welche zusätzlichen Eigenschaften sie hat.

II/S.33

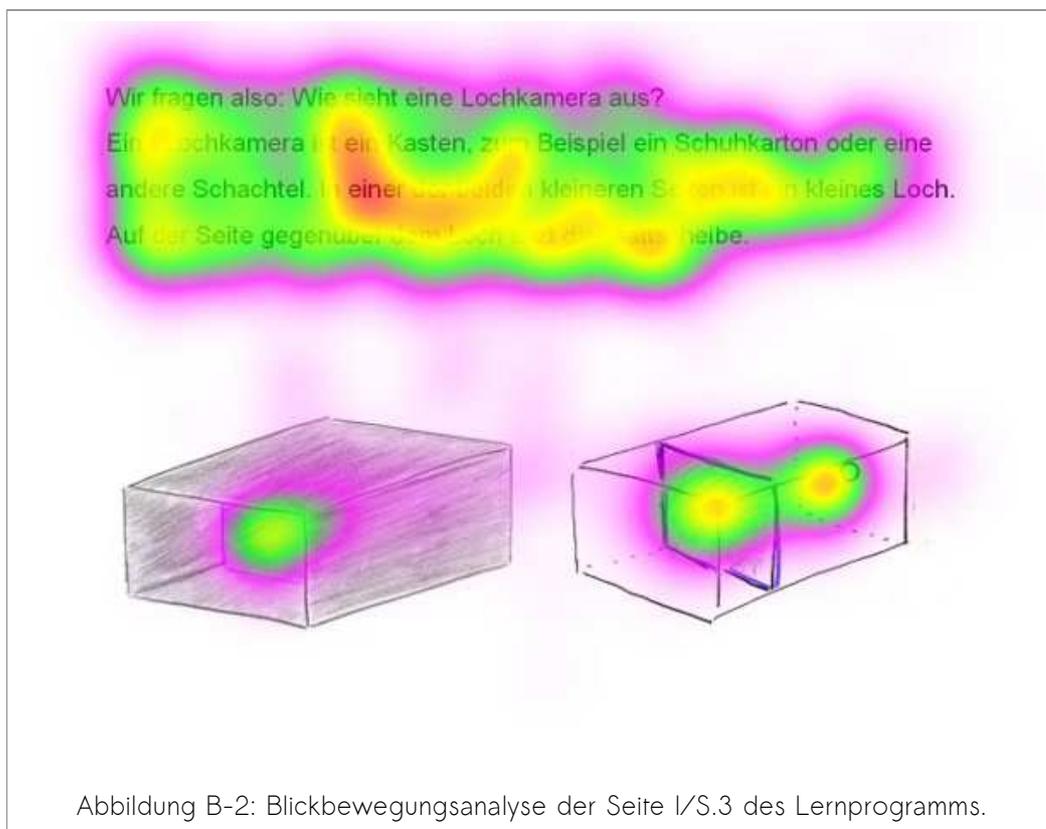
Ende

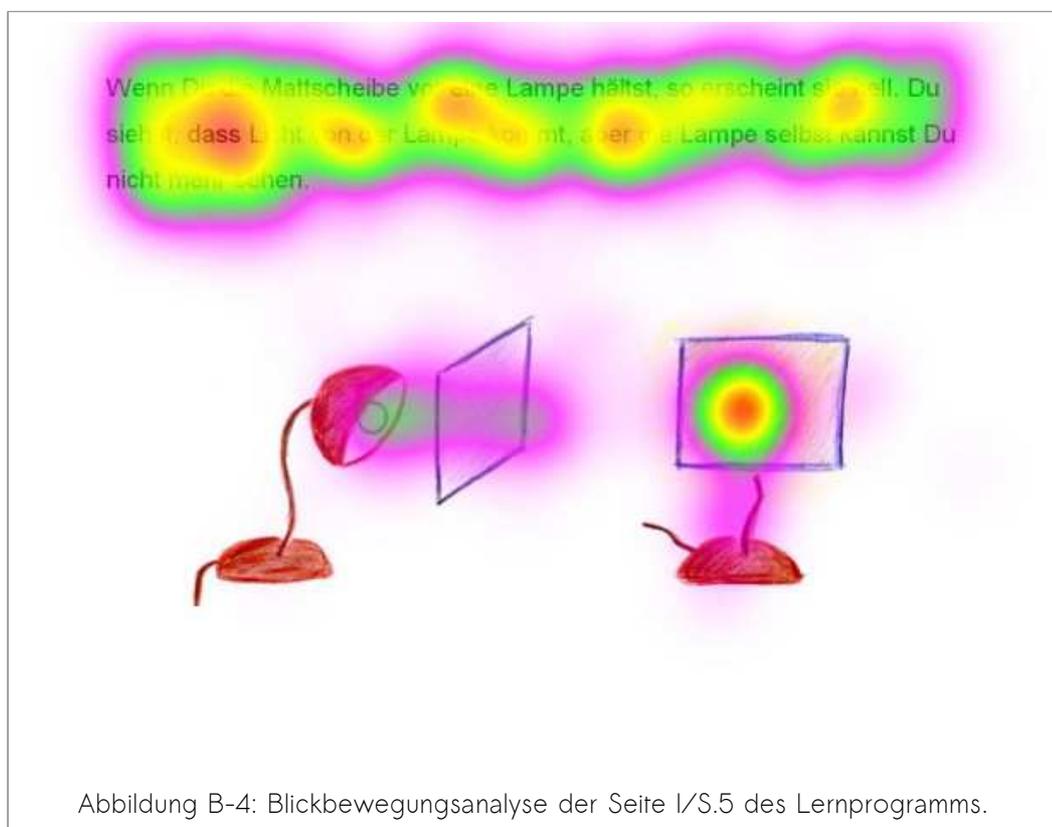
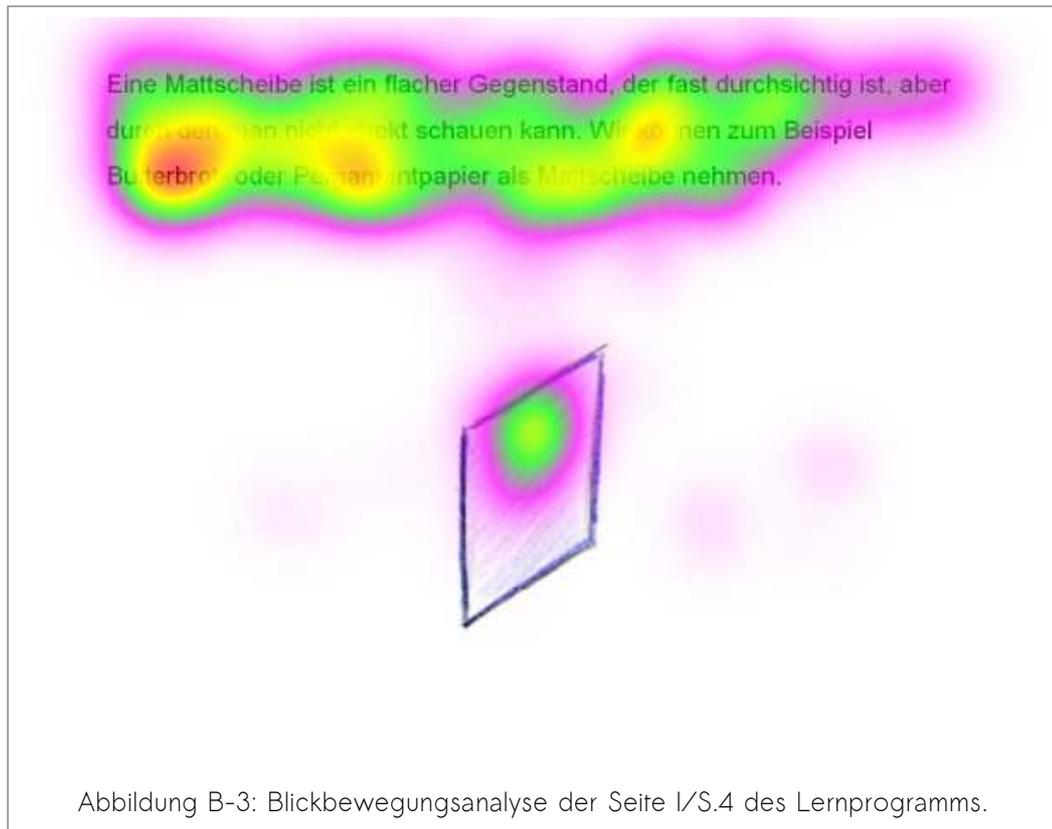
II/S.34

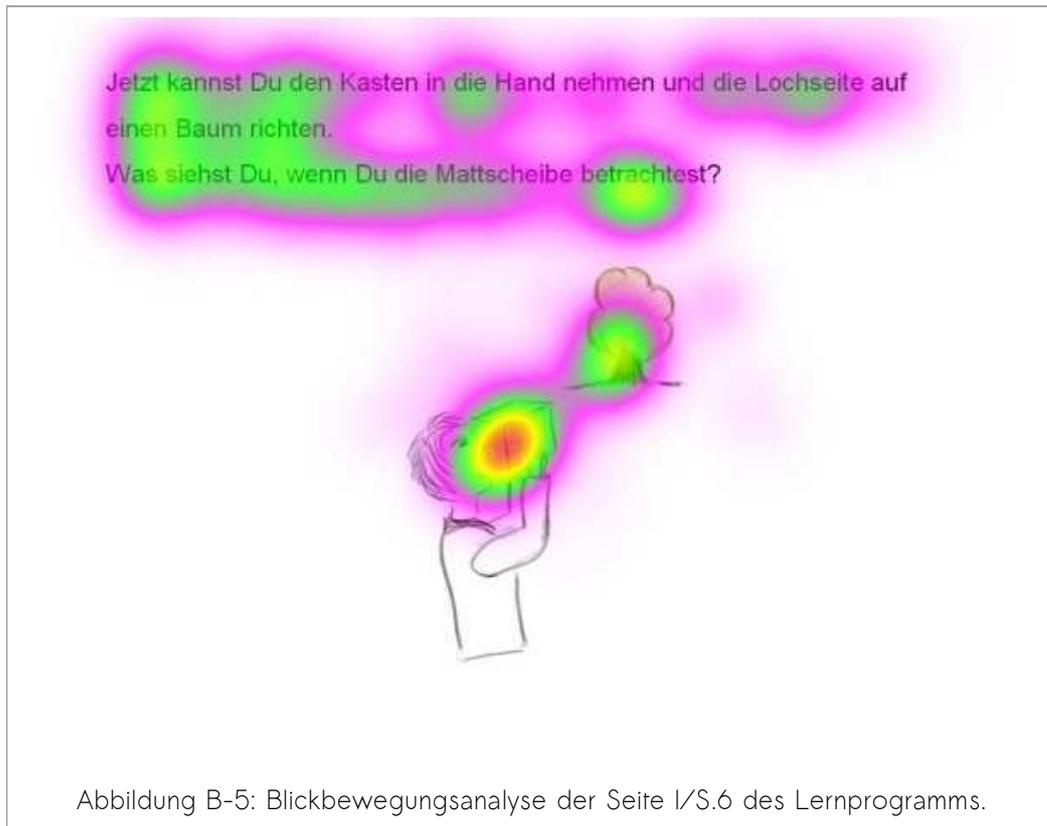
B Ergebnisse der Blickbewegungsanalyse

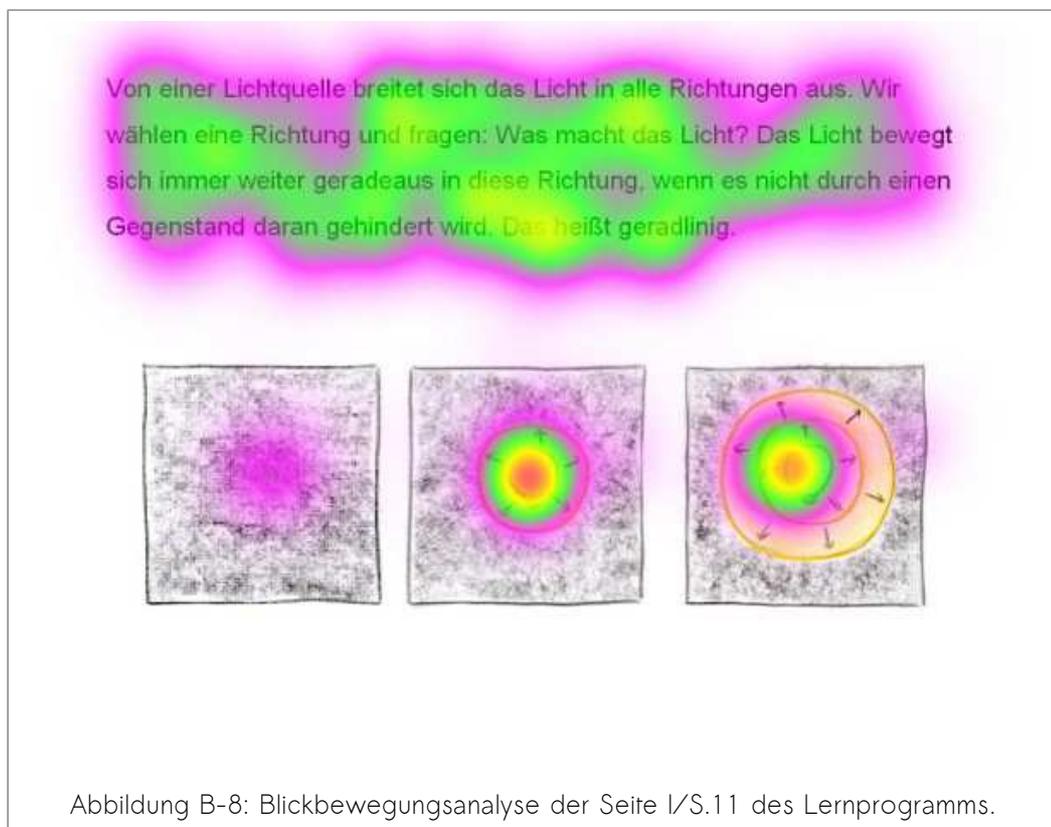
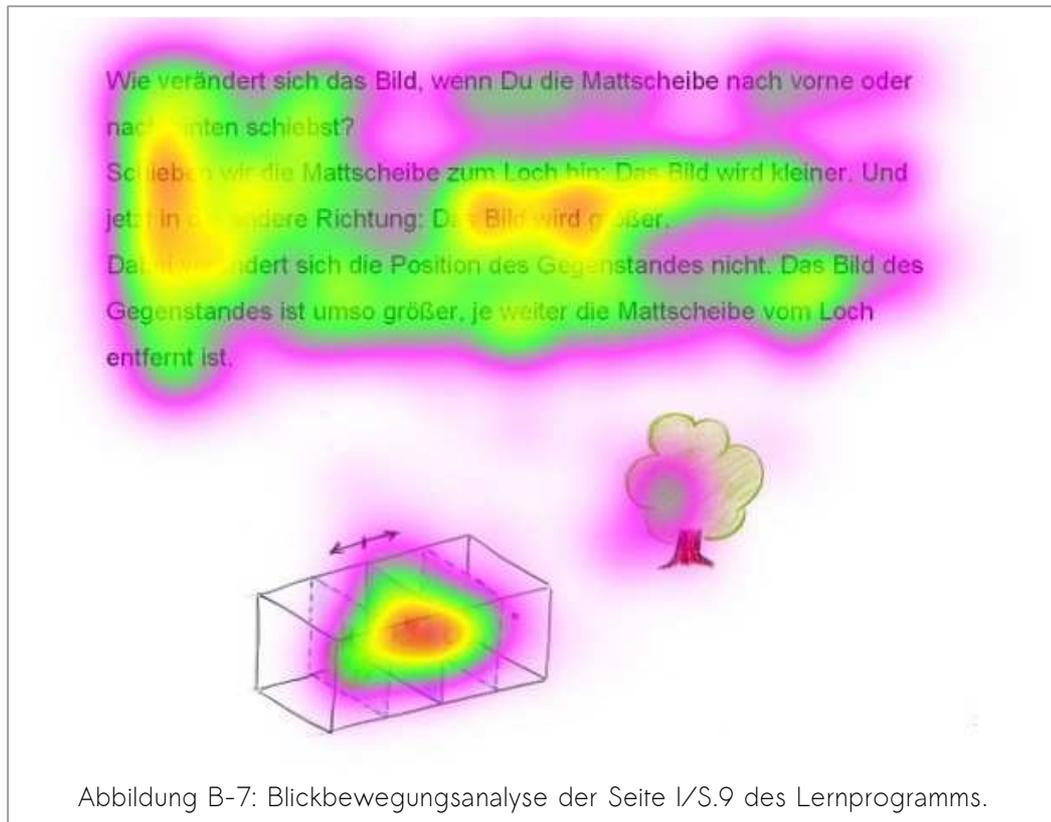


Die folgenden Hotspots stammen aus der Hauptuntersuchung von Hofmann et al. (2009, S.245), beziehen sich jedoch nur auf die K-Gruppe (N=50, 7.Klasse, Gymnasium):









Das Licht breitet sich in alle Richtungen aus. Wir denken uns einzelne Abschnitte und betrachten immer nur einen davon. So wird das Licht in Abschnitten – alle Abschnitte – wie ein Trichter aus. Er wird immer breiter. In der Physik nennen wir einen solchen Trichter auch Lichtbündel.

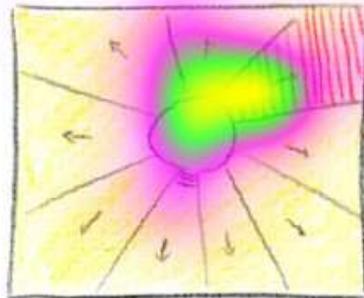


Abbildung B-9: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.14 des Lernprogramms.

Es reicht erst einmal aus, mit Hilfe von so genannten Blenden nur einen Teil des Lichtes zu verwenden, um solche Lichtbündel herzustellen. Eine Blende ist ein Gegenstand, der das Licht nur an einer kleinen Öffnung durchlässt oder an mehreren Öffnungen.

Die Lichtbündel, die hinter den Blenden entstehen, laufen auch trichterförmig auseinander – allerdings nur ein wenig, wenn das Loch sehr klein ist, kann deshalb sagen: Das Lichtbündel vergrößert sich nicht, wenn man die Strecke von der Länge eines Meters betrachtet wird.

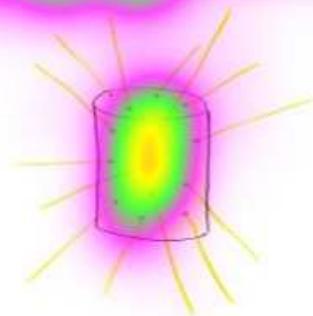
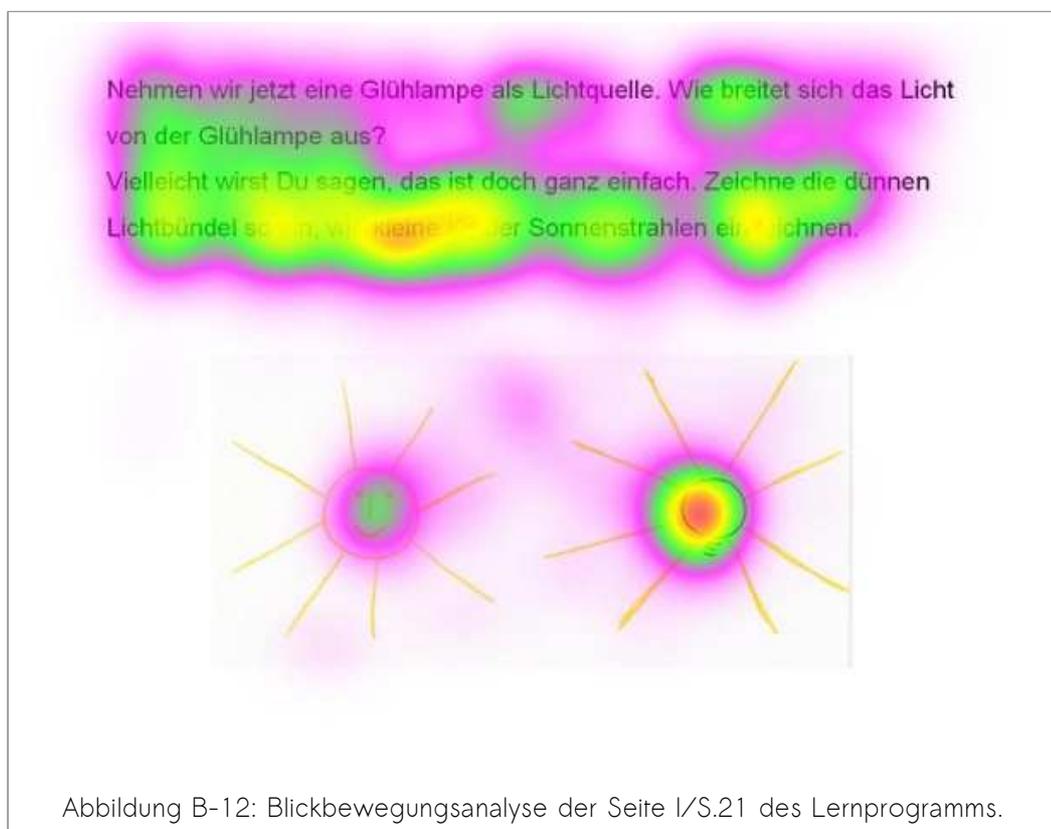
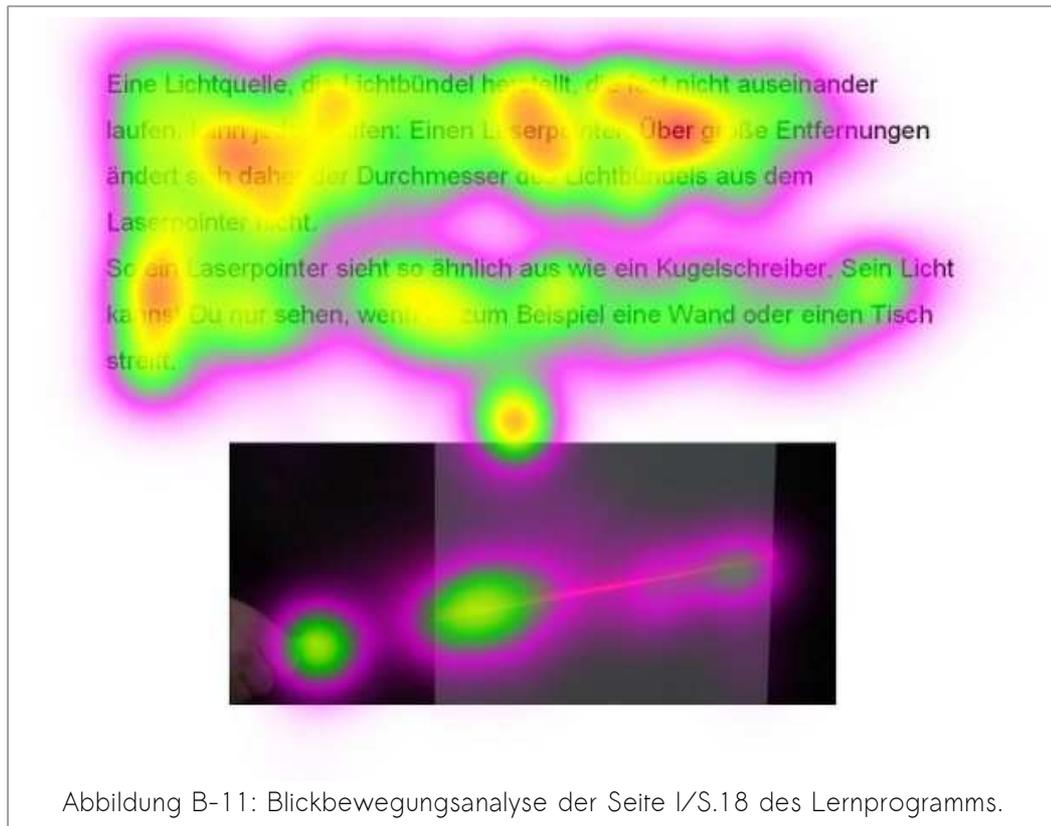


Abbildung B-10: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.17f des Lernprogramms.



Aber stimmt dieses Bild der Sonnenstrahlen mit den Beobachtungen überein? Physikerinnen und Physiker fragen sehr genau nach. Sie könnten Dich bitten, mit einer Papprolle auf den Rand einer Glühlampe zu sehen. Nimm an, dass du dabei die Papprolle schräg zu den gelben Linien hältst. Keine dieser gelben Linien gelangt in die Papprolle. Du wirst also die Lampe durch die Papprolle also gar nicht sehen. Du siehst sie aber. Etwas stimmt nicht an dem einfachen Bild.

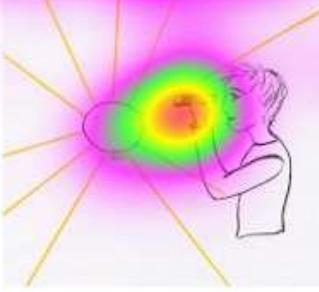


Abbildung B-13: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.22 des Lernprogramms.

Um zu verstehen, wie Licht auch schräg in die Papprolle fällt, wenden wir einen Trick an: Wir machen die Glühlampe immer kleiner. So klein, dass Du sie fast nicht mehr erkennen kannst. Die Glühlampe ist zu einem Fleck geschrumpft. Die Glühlampe ist zu einer Punktlichtquelle geworden.

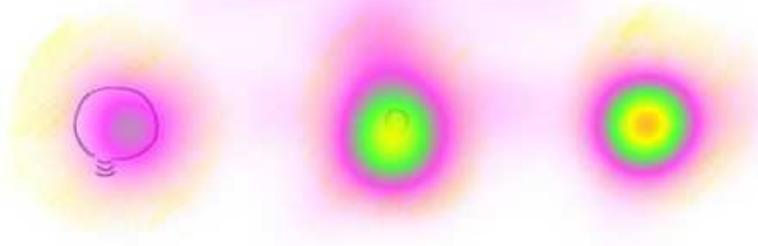


Abbildung B-14: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.23 des Lernprogramms.

In welche Richtungen wird sich das Licht von einer Punktlichtquelle ausbreiten? Die Antwort lautet: In alle Richtungen. Wir könnten das durch unendlich viele dünne Lichtbündel darstellen. Wenn wir nicht alle diesen Lichtbündel zeichnen können, haben wir nur einige ausgewählt.

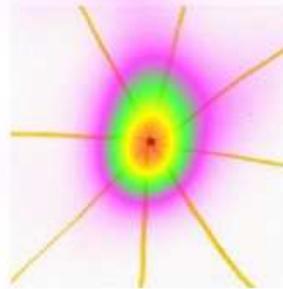


Abbildung B-15: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.24 des Lernprogramms.

Wir zerlegen jetzt die Lampe in viele kleine Punktlichtquellen. Von jeder Punktlichtquelle zeichnen wir dann dünne Lichtbündel in alle Richtungen ein. Jetzt kannst Du auch verstehen, dass es egal ist, wie Du mit Deiner Pappröhre auf die Lampe siehst. Es gibt immer Lichtbündel, die sich in Richtung der Pappröhre ausbreiten.

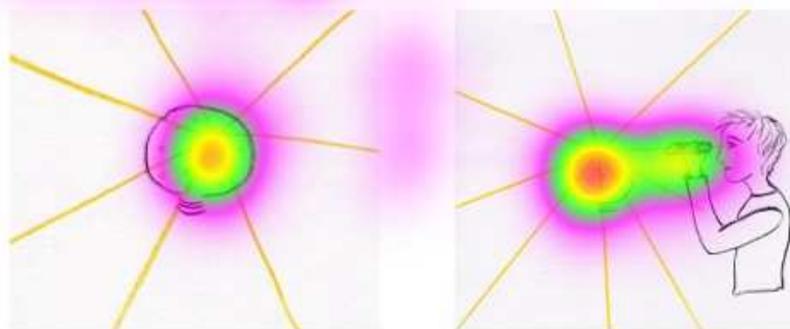


Abbildung B-16: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.25 des Lernprogramms.

Betrachten wir nun als Lichtquelle eine Kerzenflamme.
Diese zerlegen wir jetzt. Die Farben der Kerzenflamme sind übertrieben
eingezeichnet, um verschiedene Stellen der Flamme deutlich unterscheiden
zu können. In Wirklichkeit sind die Farben nicht so getrennt. An jedem
Punkt der Kerzenflamme kann man beliebig viele dünne Lichtbündel
einzeichnen, die in alle Richtungen gehen. Nehmen wir zuerst eine rote
Stelle und zeichnen rote Lichtbündel ein.

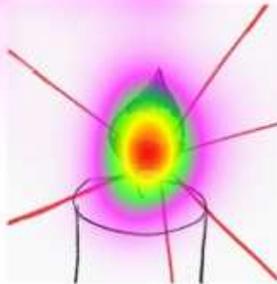


Abbildung B-17: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.28 des Lernprogramms.

Dann die Lichtbündel von einer gelben Stelle. Und jetzt von einer blauen
Stelle. Das Bild wird schnell unübersichtlich.

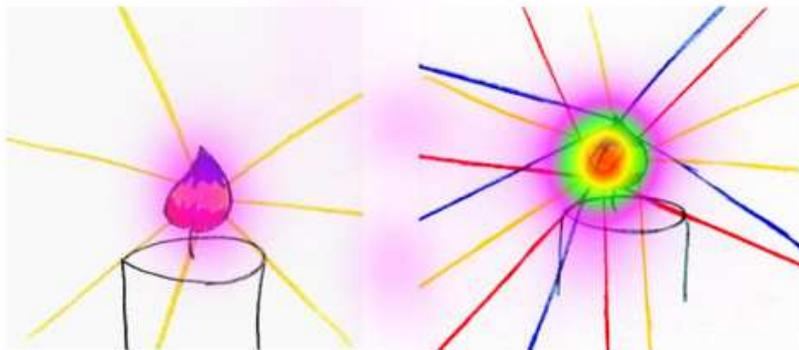


Abbildung B-18: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.29 des Lernprogramms.

Und nun haben wir alles beisammen, um zu verstehen, wie die optische Abbildung bei einer Lochkamera entsteht. Schauen wir uns nun, wie eine Kerzenflamme mit einer Lochkamera abgebildet wird. Hier sind unsere Kerzenflamme, eine Leinwand mit einem Loch – also eine Bleibecke – und die Mattscheibe.

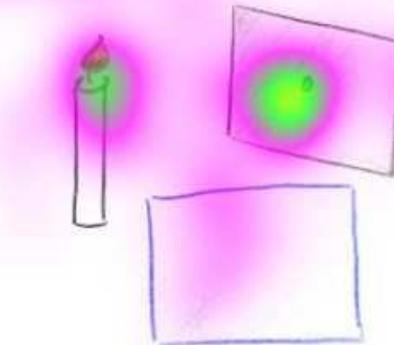


Abbildung B-19: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.30 des Lernprogramms.

Diese drei Gegenstände stellen wir in einen dunklen Raum und zünden die Kerze an. Auf der Mattscheibe erscheint das Bild der Kerzenflamme.

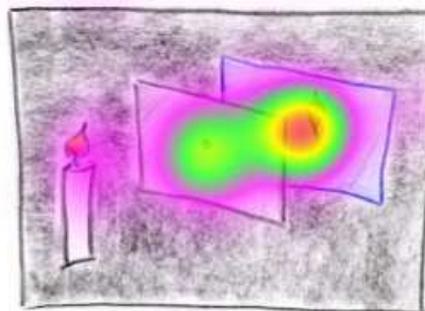


Abbildung B-20: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.31 des Lernprogramms.

Wo kommen die Lichtbündel an?

Von der roten Stelle kommen die rot gezeichneten dünnen Lichtbündel. Das Loch lässt nur wenige der roten Lichtbündel durch, die auf die Mattscheibe treffen.

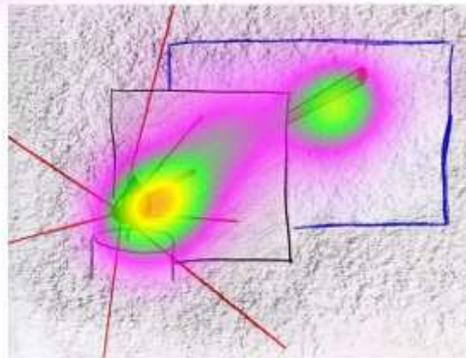


Abbildung B-21: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.33 des Lernprogramms.

Von den gelb und blau gezeichneten dünnen Lichtbündeln passieren auch nur wenige das Loch. Das geschieht natürlich nicht hintereinander, sondern im gleichen Augenblick.

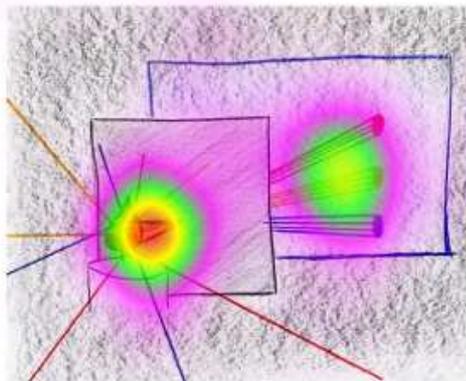


Abbildung B-22: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.34 des Lernprogramms.

Was macht die Pappe mit ihrem Loch? Das Loch sortiert dünne Lichtbündel aus: Und die Pappe verhindert, dass andere Lichtbündel auf die Mattscheibe gelangen können. Das Loch lässt Licht durch und kommt das Licht auf der Mattscheibe an, so können wir einen kleinen Lichtfleck sehen. Die schwarze Pappe hingegen nimmt Licht auf.

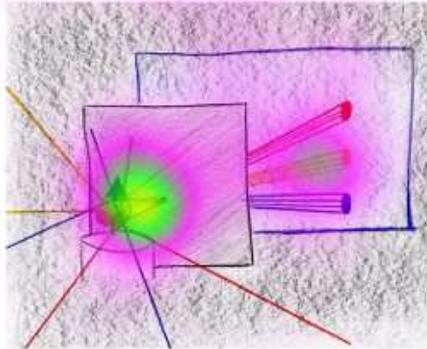


Abbildung B-23: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.35 des Lernprogramms.

Wie entsteht das Bild? Wir zeichnen nur das Licht ein, das von einem Punkt aus durch das Loch gelangen kann. Die dünnen Lichtbündel fassen wir zu einem großen Lichtbündel zusammen.

Licht von der roten Stelle... das Loch lässt nur einen Teil des Lichtes durch. Auf der Mattscheibe zeigt sich ein roter Fleck. Licht von der gelben Stelle... das Loch lässt nur einen Teil des Lichtes durch. Auf der Mattscheibe zeigt sich ein gelber Fleck. Licht von der blauen Stelle... mit einem blauen Fleck.

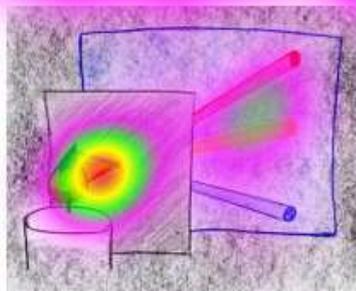


Abbildung B-24: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.36 des Lernprogramms.

Du weißt jetzt schon, wie es weitergeht. Wir machen das für jede Stelle der Kerzenflamme. Die Lichtbündel zwischen Kerzenflamme und Bild lassen wir in unserer Skizze weiß sein. Aus den einzelnen kleinen Lichtflecken setzt sich das Bild der Kerze zusammen. Das Bild steht, wie wir schon gesehen haben, auf dem Kopf.

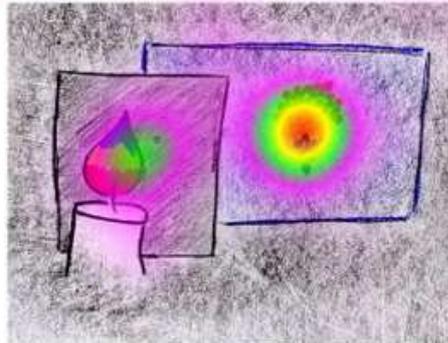


Abbildung B-25: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.37 des Lernprogramms.

Betrachten wir zum Schluss die optische Abbildung an der Lochkamera mit einer anderen Figur. Was wird geschehen, wenn die Blende in der Lochkamera entfernt wird?

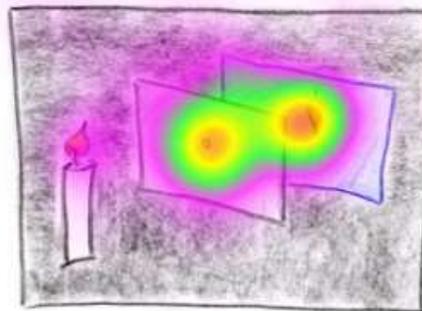


Abbildung B-26: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.39 des Lernprogramms.

Entfernen wir also die Blende. Das Bild verschwindet. Betrachten wir die
 Mattscheibe, so erkennen wir, dass jetzt an jede Stelle von allen Punkten,
 in die wir die Kerze zerlegt haben, Licht gelangt. Ein bestimmtes Muster
 entsteht. Die Blende ist weg und kann die dünnen Lichtbündel nicht mehr
 sortieren.

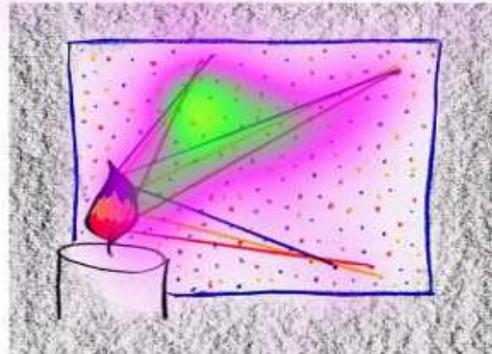


Abbildung B-27: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.40 des Lernprogramms.

Betrachtet man eine wirkliche Kerzenflamme, so dürfen die Farben nicht so
 überleben gezeichnet werden. In der Kerzenflamme überwiegt das gelbe
 Licht und die Mattscheibe wird gelblich hell, wenn die Blende entfernt wird.

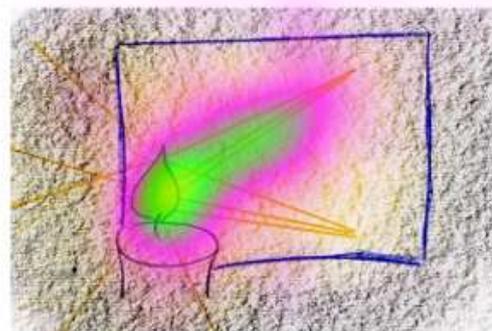


Abbildung B-28: Blickbewegungsanalyse der Seite I/S.41 des Lernprogramms.

C Materialien zu den Vorstudien

C.1 Anleitung

Die Probanden haben vor dem Lernen mit dem Lernprogramm die folgenden Anweisung bekommen:

„Du wirst gleich mit einem Lernprogramm arbeiten, das für Schülerinnen und Schüler geschrieben ist. Das Thema gehört zur Physik, es handelt sich um die optische Abbildung. An der Universität Potsdam versuchen wir herauszufinden, wie Text und Bild gestaltet werden soll, damit man am einfachsten und am wirksamsten Physik lernen kann. Deswegen ist deine Hilfe als Lernende sehr wichtig dabei. Ich bitte Dich darum, dass Du jeden Abschnitt sehr genau beachtest.

(Die folgende Passage wird nur bei der Vorstudie zu Visualisierungen vorgelesen:

Ich werde Dir nach jeder Seite des Lernprogramms zu den Bildern und Animationen Fragen stellen. Es geht hier nicht um die Lernleistung, es kommt nicht darauf an, ob Du richtig oder falsch antwortest. Ich möchte gerne erfahren, was Du darüber denkst und was Du Dir dazu vorstellst. Du kannst ruhig offen sagen, wenn Dir etwas unverständlich vorkommt.)

Du wirst zuerst den gesprochenen Text hören und hast dann die Möglichkeit, diesen in geschriebener Form zu lesen. Du kannst in dem Lernprogramm auch zurückgehen und Abschnitte, die nicht ganz klar (oder schwierig) sind, nochmals lesen. Manchmal ist es hilfreich, die Bilder und Animationen noch einmal anzuschauen. Der Start-Knopf startet die Animation immer neu.

Du kannst natürlich jeder Zeit das Interview abbrechen. Hast Du dazu Fragen? ... (WARTEN)
Dann machen wir eine Tonprobe!“

C.2 Leitfaden des Interviews

Tonprobe

„Ich bitte Dich, bei den folgenden Fragen (**Leitfaden 1.0**) ins Mikrofon zu antworten:

- Wie heißt Du?
- Wie alt bist Du?
- Deine Physiknote? Magst du Physik? (eher beliebt, eher unbeliebt)
- Wie oft benutzt Du den Rechner? Wozu? (Textgestaltung, Internet, Spiele ...?)
- Hast Du schon mit einem Lernprogramm gearbeitet? In welchem Fach?

... Jetzt können wir loslegen!“

Fragen zur Visualisierungen

Die folgenden Fragen (**Leitfaden 1.1**) werden zu jeder Seite des Lernprogramms im Verlauf des Lernens gestellt. Das Wort „Bild“ wird in der zweiten Vorstudie der Visualisierung entsprechend mit „Animation“ vertauscht. Das Zeichen „/“ führt alternative Fragen auf:

- Was siehst Du auf dem Bild?/ Was sagt das Bild?/ Was zeigt das Bild?
- Was sagt der Text?
- Was siehst Du nicht auf dem Bild?
- Zeigt das Bild alles, was im Text beschrieben ist?
- Zeigt das Bild etwas, das im Text nicht beschrieben ist?
- Wo passen Text und Bild nicht zusammen?

Die Fragen (**Leitfaden 1.2**)⁴³ zu den ausgewählten Bilder des ersten Teils des Lernprogramms lauten:

- Zeigen die beiden Bilder den gleichen Gegenstand (S.3)? Wenn ja, ist ihre Ähnlichkeit ausreichend?
- Könntest Du die Lampe auf dem zweiten Bild erkennen, ohne das erste Bild vorher gesehen zu haben (S.5)?
- Was ist wichtig auf dem Bild? Auf welchem Bild tritt das Wichtige besser hervor (S.7*)?
- Was zeigen die drei Mattscheiben? Was zeigen die Pfeile (S.9*)?
- Ist es auf dem ersten Bild die Lampe eingeschaltet? Ist die Dunkelheit erkennbar? (S.11)
- Wo ist die Glühlampe (S.17)? Warum habe ich die dünnen Lichtbündel im Kasten nicht eingezeichnet?
- Was siehst Du auf dem Bild? Kannst Du die räumliche Anordnung von Laserpointer und Papierblatt zeigen (S.19, 20*)?
- Wie hängt diese Bildreihe zusammen? Sind die dünnen Lichtbündel in der ersten Variation störend (S.28, 29*)?
- Was siehst Du auf der Mattscheibe? Welches Bild findest Du besser und warum (S.34*)?
- Welche Gemeinsamkeiten und welche Unterschiede erkennst Du in diesen zwei Bildern (S.40, 41*)?

⁴³ Die aufgeführten Seitenzahlen beziehen sich auf das erste Teil des Lernprogramms (Anhang A.1). Das Sternchen „*“ bedeutet, dass zu dem entsprechenden Bild auch Alternativversionen vorgelegt wurden.

Bewertung des Lernprogramms

Die folgenden Fragen (**Leitfaden 2.0**) werden nach der Lernphase in jeder Vorstudie gestellt:

- Was hat Dir an dem Lernprogramm gefallen?/ Was findest Du besonders gut?
- Was hat Dir nicht gefallen?/ Was stört Dich am Lernprogramm?
- Wie würdest Du das Lernprogramm verbessern?/ An welchen Stellen sollten wir etwas anders machen?/ Welche Verbesserungsvorschläge hast Du?

Zusätzliche Fragen in der ersten Vorstudie (**Leitfaden 2.1**):

- Das Programm besteht aus Texten und aus Bildern. Wie schätzt Du den jeweiligen Anteil ein: gab es zu viel Text oder zu viele Bilder?
- Wie findest Du die Anordnung von Text und Bild auf dem Bildschirm (oben Text, unten Bild)
- Haben Text und Bild zusammengepasst? Wo nicht?
- Wie beurteilst Du die Menge von Information pro Seite? Hättest Du Dir mehr Bilder und Text oder eher weniger pro Seite gewünscht?

Zusätzliche Fragen in der zweiten Vorstudie (**Leitfaden 2.2**):

- Was denkst Du über die Handzeichnungen?
- Hättest Du Dir Computer-Grafik gewünscht?
- Wie hast Du das Zurückklicken und Vorwärtsklicken im Lernprogramm empfunden?
- Hat Dich gestört oder nicht gestört, dass immer die Animationen gestartet werden, wenn Du auf die vorherige Seite zurückgehst?
- Bist Du gewohnt Notizen zu machen? (Wie machst Du das? In welchem Fach?)

Abschließende Frage:

- Zum Schluss noch mal die Frage vom Anfang, vielleicht fällt Dir jetzt noch mehr/ doch noch was ein: Was hat Dir an dem Lernprogramm gefallen, was hat Dir nicht gefallen?

D Materialien der Hauptuntersuchung

D.1 Anweisungen zu der Hauptuntersuchung

Instruktion zu der ersten Sitzung

„Mein Name ist ... , meine Kollegin heißt Vor vier Wochen habt ihr schon einen Wissenstest geschrieben. Heute werdet ihr mit einem Lernprogramm arbeiten. Wir möchten herausfinden, wie gut ihr damit Physik lernen könnt. Das Thema gehört zum Bereich „Optik“. Es handelt sich um die „Optische Abbildung“. Im Lernprogramm werdet ihr zuerst den gesprochenen Text hören und habt anschließend die Möglichkeit, diesen in geschriebener Form zu lesen. Ihr könnt im Lernprogramm auch zurückgehen und Abschnitte, die nicht ganz klar oder schwierig sind, nochmals lesen. Manchmal ist es hilfreich, die Bilder oder Animationen noch einmal anzuschauen. Der Start-Knopf startet die Animation immer neu. Wenn ihr fertig seid, bitte ich euch, den Nachtest zu bearbeiten. Es geht hier nicht um Schulleistung, wir möchten nur wissen, was ihr mit diesem Lernprogramm über die Physik gelernt habt. Deswegen bitte ich euch, auch wenn es manchmal schwer fällt, selbständig zu arbeiten. Die Hefte sind durch Codenummern anonymisiert. Es wird daher niemand wissen, wer das geschrieben hat. Wenn es euch nichts ausmacht, könnt ihr auch euren Vornamen hinschreiben, es erleichtert die Zuordnung zum Vortest. Ich bin zwar nicht eure Lehrerin, möchte aber trotzdem um Erlaubnis bitten, euch während der Untersuchung ruhig zu verhalten. Ist das O.K.? ... Danke schön! Ihr könnt jeder Zeit die Untersuchung abbrechen. Ich wünsche mir natürlich das Gegenteil. Ich hoffe, dass es euch Spaß machen wird. Ich danke euch für eure Hilfe. Habt ihr noch Fragen? Ihr könnt auch zwischendurch Fragen stellen. Dann können wir loslegen!“

Instruktion zu der zweiten Sitzung

„Heute ist unsere letzte Sitzung. Ihr werdet mit dem zweiten Teil des Lernprogramms arbeiten und danach den Wissenstest ausfüllen. Die Spielregeln sind so wie gestern/ vorige Woche: Erstens, die Testhefte sind anonymisiert. Zweitens, ihr werdet selbständig arbeiten. Drittens, ich darf euch um Ruhe bitten. Hat jemand Fragen? ... Dann könnt ihr anfangen!“

Protokoll der Hauptuntersuchung

- Nr.
- Allgemeine Angaben (Schule, Klasse, Ort/ Raum-Nr., Datum, Stunde/ Uhrzeit)
- Durchführung (Versuchsleiterin, Hilfe, LehrerIn)
- Angaben zu den Schülern (Anzahl insgesamt, Anwesend, Fehlende)
- Bemerkungen, Eindrücke (Wie waren die Schüler? Gab's Fragen? Wenn ja, welche Hilfestellung hast Du gegeben? Gab's unerwartete Situationen, Probleme oder Abweichung von den geplanten Verlauf?)

D.2 Notizenblätter

Notizenblatt

Lochkamera 1

Liebe Schülerin, lieber Schüler,
bitte gib hier deine Codenummer an:

--	--	--	--	--	--

Die Codenummer ergibt sich aus den ersten 3 Buchstaben des Mädchennamens deiner Mutter und den ersten 3 Ziffern des Geburtstages deiner Mutter

Beispiele:

Mädchenname der Mutter: Krüger

k	r	ü	2	2	1
---	---	---	---	---	---

Ihr Geburtstag: 22.10.1973

Wäre sie am 1.3.1973 geboren,
so lautet die Codenummer:

k	r	ü	1	3	1
---	---	---	---	---	---

Gib bitte deinen Vornamen an, wenn das dir nichts ausmacht, deine Anonymität ist gesichert:

Liebe Schülerin, lieber Schüler,

ich bitte dich, dass du die Seiten 2 – 10 im Lernprogramm sehr genau beachtest und kurz zusammenfasst, was dir wichtig erschien.

Da ist Platz für deine Notizen und Zeichnungen:

D.3 Allgemeine Fragen

- Wie alt bist du?
- Geschlecht: W () M ()
- In welcher Klassenstufe bist du?
- Deine Physiknote im letzten Zeugnis:
- Deine Deutschnote im letzten Zeugnis:
- Im Fernsehen sehe ich () oft, () gelegentlich, () nie Sendungen zu physikalischen Themen an.
- Welches sind deine drei liebsten Schulfächer?
Welches sind deine drei ungeliebtesten Schulfächer?

Selbstkonzept (P-Skala)

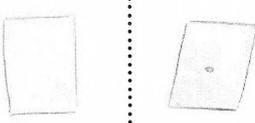
Einige Aussagen zum Physikunterricht: Gib bitte an, inwieweit diese für dich zutreffend sind.	trifft völlig zu	trifft eher zu	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu
P1. Was wir im Physikunterricht durchführen, verstehe ich meistens.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
P2. Ich bin im Physikunterricht ganz gut.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
P3. Physik fällt mir schwerer als den meisten anderen in der Klasse.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
P4. Egal, wie ich mich anstrenge, ich komme in Physik einfach nicht zurecht.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
P5. Für Physik habe ich einfach keine Begabung.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
P6. Ich brauche immer etwas mehr Zeit als die anderen, um Physikaufgaben zu lösen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Selbstwirksamkeitserwartung in der Physik (S-Skala)

Einige Aussagen zum Physikunterricht: Gib bitte an, inwieweit diese für dich zutreffend sind.	trifft nicht zu	trifft kaum zu	trifft eher zu	trifft genau zu
S1. Ich kann auch die schwierigen Aufgaben im Physikunterricht lösen, wenn ich mich anstrenge.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
S2. Es fällt mir im Fach Physik leicht, neuen Unterrichtsstoff zu verstehen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
S3. Wenn ich im Unterricht eine schwierige Aufgabe an der Tafel lösen soll, glaube ich, dass ich das schaffen werde.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
S4. Selbst wenn ich mal längere Zeit krank sein sollte, kann ich in Physik immer noch gute Leistungen erzielen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
S5. Wenn der Physiklehrer / die Physiklehrerin im Unterricht besonders schnell vorangeht, werde ich die geforderten Leistungen kaum schaffen können.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
S6. Auch wenn der Physiklehrer / die Physiklehrerin an meinen Fähigkeiten zweifelt, bin ich mir sicher, dass ich gute Leistungen erzielen kann.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
S7. Ich bin mir sicher, dass ich im Fach Physik auch dann noch meine gewünschten Leistungen erreichen kann, wenn ich mal eine schlechte Note bekommen habe.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

D.4 Wissenstests zum ersten Teil des Lernprogramms (T₁)

1. Welche Gegenstände sind in den beiden folgenden Zeichnungen dargestellt?



.....

.....

2. Erkläre bitte wie bei einer Lochkamera das Bild auf der Mattscheibe entsteht?

.....

.....

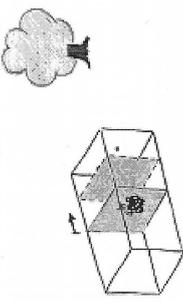
.....

.....

3. Wie kann man Lichtbündel herstellen, die sich nicht verbreitern?

.....

.....



4. Wie verändert sich das Bild auf der Mattscheibe, wenn die Mattscheibe zum Loch geschoben wird?

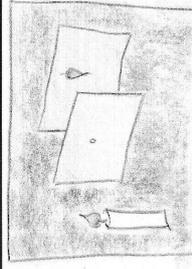
Kreuze bitte an:

Das Bild wird größer.

Die Größe des Bildes verändert sich nicht.

Das Bild wird kleiner.

Ich weiß nicht.



5. Was passiert, wenn die Lochblende entfernt wird?

.....

.....

6. Wie verändert sich das Bild auf der Mattscheibe, wenn die Blende zur Mattscheibe geschoben wird?

Kreuze bitte an:

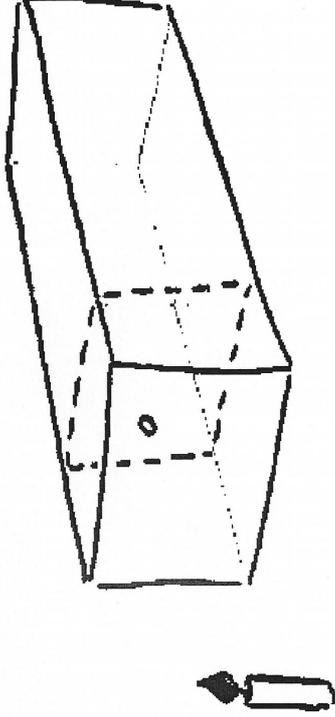
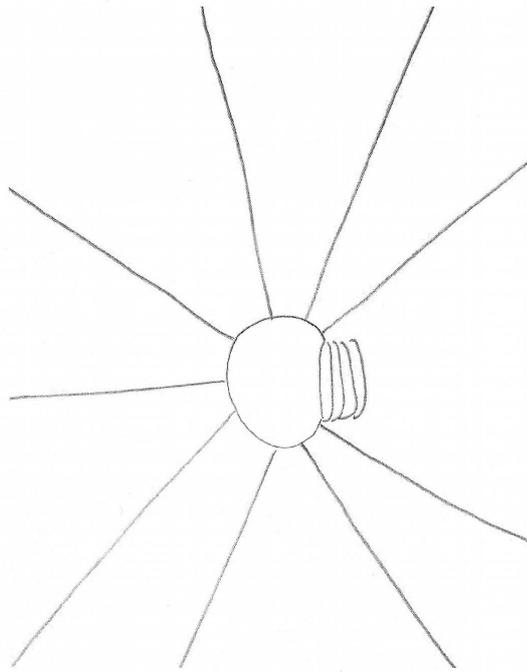
- Das Bild wird größer.
- Die Größe des Bildes verändert sich nicht.
- Das Bild wird kleiner.
- Ich weiß nicht.

7. Die Stellen A, B, C und D der Kerzenflamme werden durch das Loch auf die Mattscheibe abgebildet. Die Zeichnung ist nicht ganz exakt.

Ordne den Punkten A, B, C und D die Punkte W, X, Y und Z auf der Mattscheibe zu:

- Zu Punkt A gehört auf der Mattscheibe der Punkt
- Zu Punkt B gehört auf der Mattscheibe der Punkt
- Zu Punkt C gehört auf der Mattscheibe der Punkt
- Zu Punkt D gehört auf der Mattscheibe der Punkt

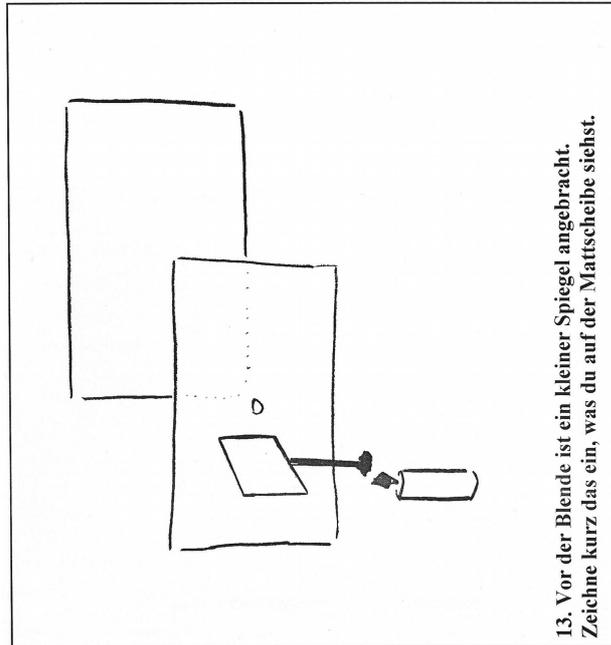
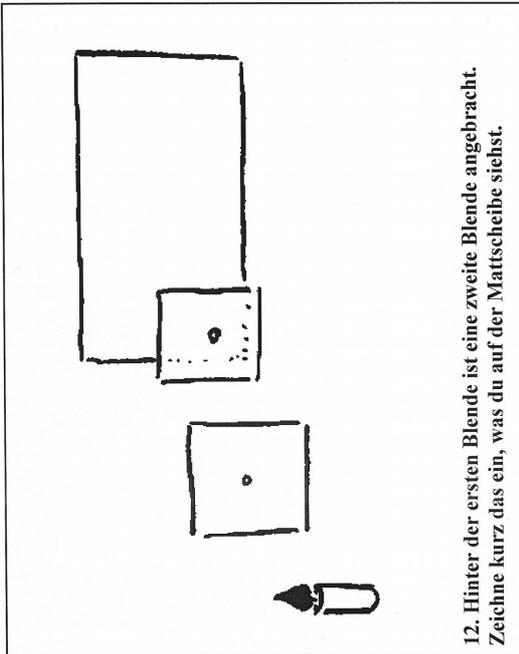
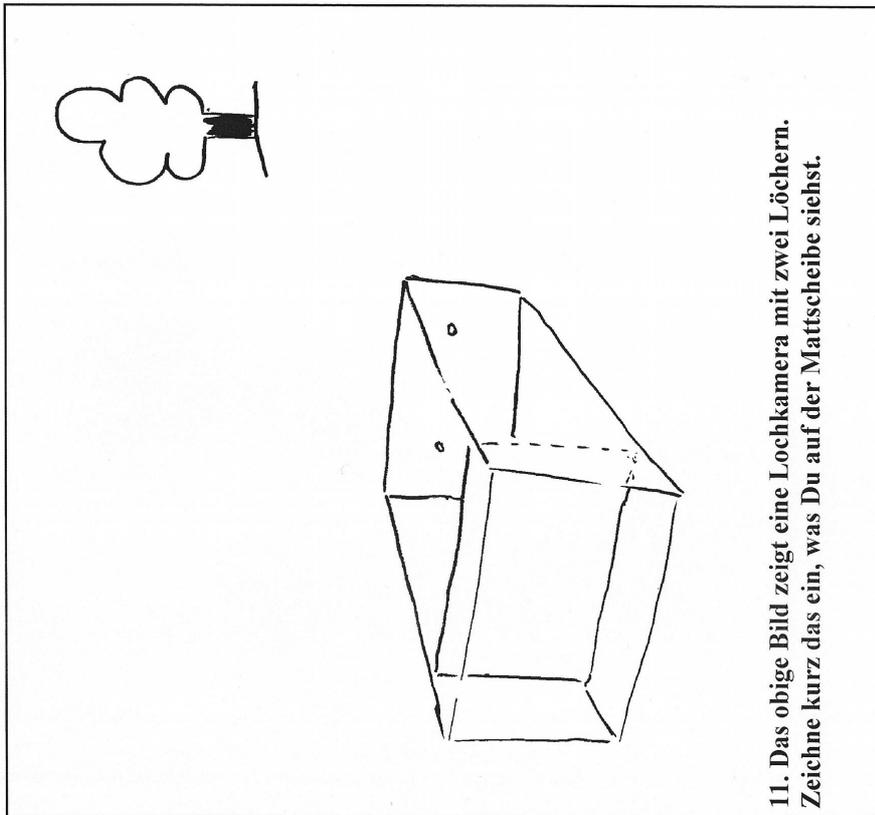
8. Die folgende Abbildung zeigt eine Glühlampe im Querschnitt, von der dünne Lichtbündel ausgehen. Verändere die Zeichnung, wenn du glaubst, dass die Ausbreitung des Lichts nicht richtig dargestellt ist.

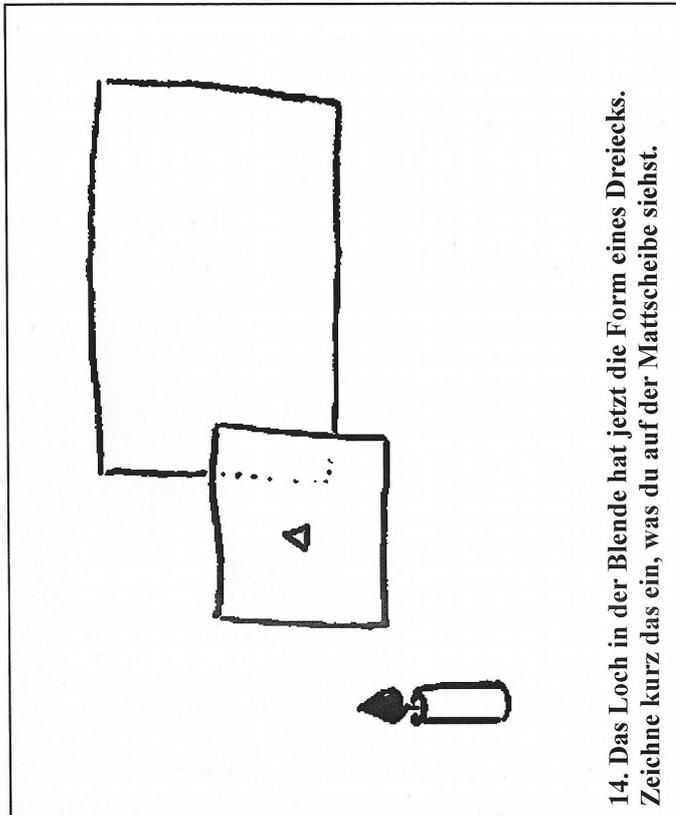


9. Das obige Bild zeigt eine Lochkamera, bei der das Loch nicht mehr in der Mitte der Blende angebracht ist. Wenn du denkst, dass ein Bild entsteht, dann zeichne das Bild ungefähr ein.

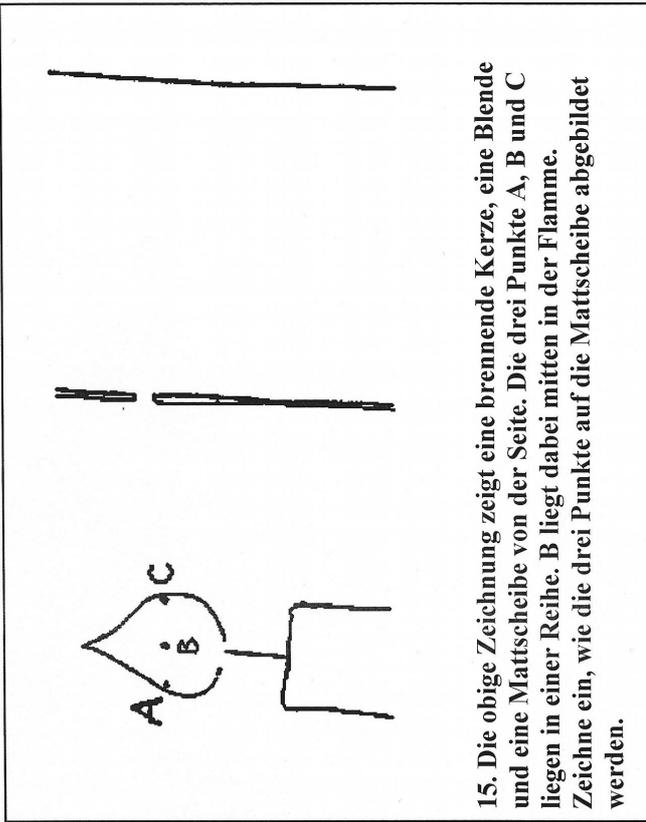


10. Zeichne kurz ein, wie du eine Neonröhre in Punktlichtquellen zerlegst. Zeichne auch Licht, das von der Neonröhre ausgeht.





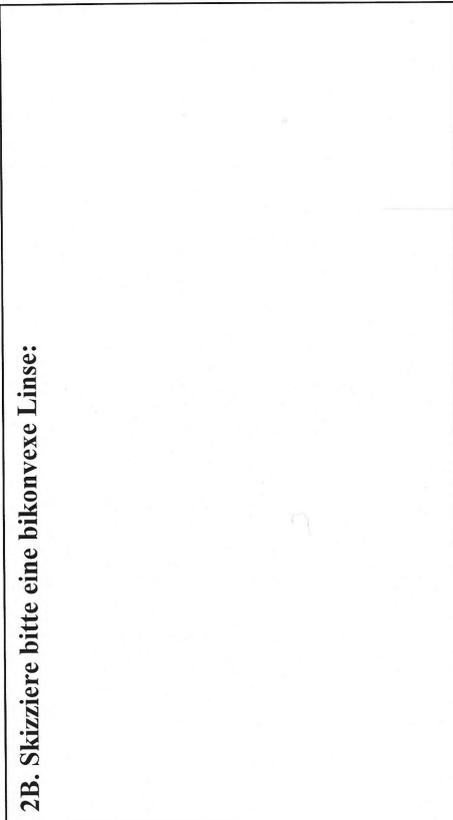
14. Das Loch in der Blende hat jetzt die Form eines Dreiecks. Zeichne kurz das ein, was du auf der Mattscheibe siehst.



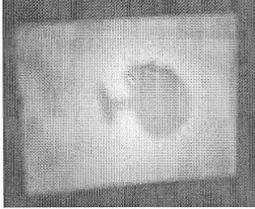
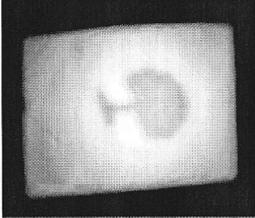
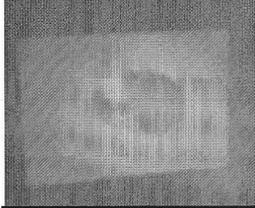
15. Die obige Zeichnung zeigt eine brennende Kerze, eine Blende und eine Mattscheibe von der Seite. Die drei Punkte A, B und C liegen in einer Reihe. B liegt dabei mitten in der Flamme. Zeichne ein, wie die drei Punkte auf die Mattscheibe abgebildet werden.

D.5 Wissenstests zum zweiten Teil des Lernprogramms (T₂)

2B. Skizziere bitte eine bikonvexe Linse:



3B. Ordne den Bildern die entsprechenden Löcher oder die Linse zu.

A
B
C

Zu einem kleinen Loch gehört am ehesten Bild ...
 Zu einem großen Loch gehört am ehesten Bild ...
 Zu einer Linse gehört am ehesten Bild ...

1aB. Wie verändert sich das Bild auf der Mattscheibe, wenn das Loch der Lochkamera vergrößert wird?

- Das Bild wird heller.
- Das Bild wird dunkler.
- Das Bild wird weder heller noch dunkler.
- Ich weiß nicht.

Bitte begründe Deine Antwort.

.....

.....

1bB. Wie verändert sich das Bild auf der Mattscheibe, wenn das Loch der Lochkamera verkleinert wird?

- Das Bild wird schärfer.
- Das Bild wird unschärfer.
- Das Bild wird weder schärfer noch unschärfer.
- Ich weiß nicht.

Bitte begründe Deine Antwort.

.....

.....

4B. Was kannst du tun, um bei der optischen Abbildung mit der Linse auf der Mattscheibe nicht nur die Flamme, sondern auch den Kerzenstumpfen zu sehen?

.....

.....

.....

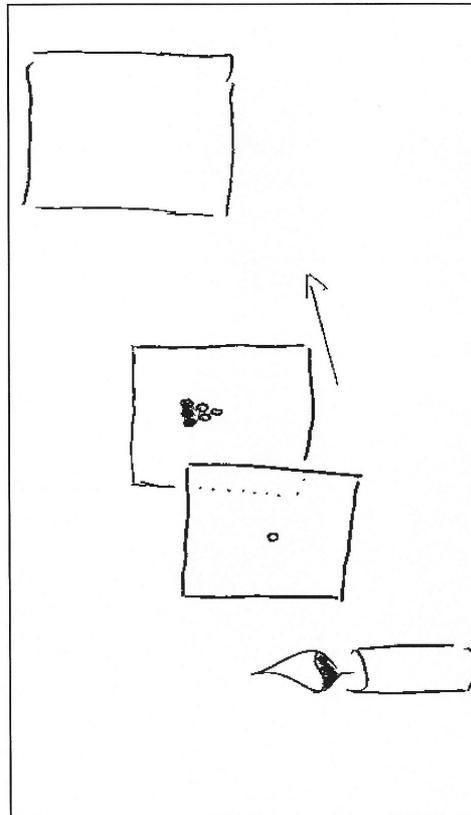
6B. Erkläre, weshalb Du einen Baum in der Landschaft überhaupt sehen kannst?
Der Baum brennt nicht, und der Baum ist keine Glühlampe.

.....

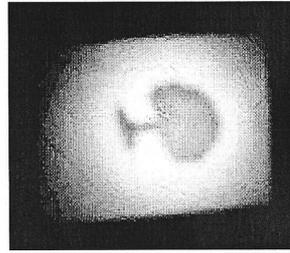
.....

.....

.....



5B. Die Mattscheibe wurde nach hinten verschoben. Wie verändert sich das Bild auf der Mattscheibe? Skizziere gegebenenfalls kurz die Veränderung.



7B. Bild A wurde mit vermutlich mit

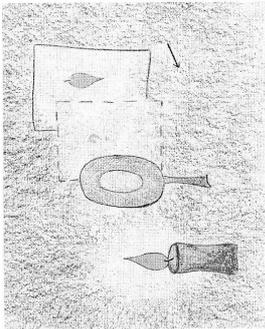
- einem kleinen Loch
- einem großen Loch
- einer Bikonvexlinse

hergestellt.

Bitte begründe Deine Wahl:

.....

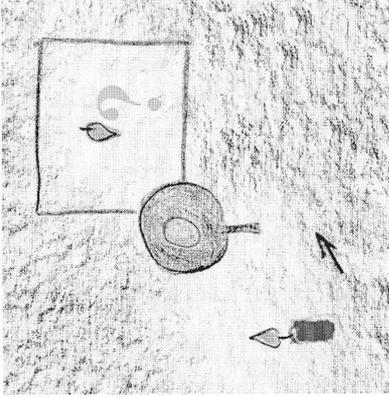
.....



8B. Wie verändert sich das Bild auf der Mattscheibe, wenn die Mattscheibe zur Linse geschoben wird? Kreuze bitte an:

- Das Bild wird größer.
- Das Bild wird kleiner.
- Das Bild wird weder größer noch kleiner.
- Ich weiß nicht.

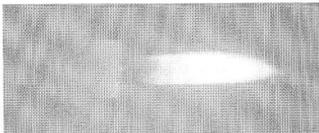
- Das Bild wird schärfer.
- Das Bild wird unscharf.
- Das Bild wird weder schärfer noch unschärfer.
- Ich weiß nicht.



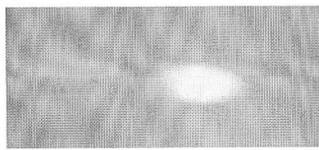
9B. Wie verändert sich das Bild auf der Mattscheibe, wenn die Linse zur Mattscheibe geschoben wird? Kreuze bitte an:

- Das Bild wird größer.
- Das Bild wird kleiner.
- Das Bild wird weder größer noch kleiner.
- Ich weiß nicht.

- Das Bild wird schärfer.
- Das Bild wird unscharf.
- Das Bild wird weder schärfer noch unschärfer.
- Ich weiß nicht.



A



B

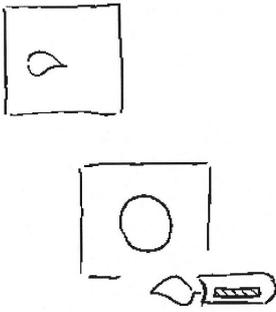
10B. Abbildung A zeigt eine Kerze, die zusätzlich mit einer Lampe beleuchtet wurde. Der Kerzenstumpen ist sichtbar. Abbildung B zeigt den Kerzenstumpen ohne zusätzliche Beleuchtung. Ein Teil des Kerzenstumpens ist auch in Abbildung B sichtbar. Erkläre bitte, weshalb ein Teil des Kerzenstumpens auch in Abbildung B sichtbar ist.

.....

.....

.....

.....



11B. Das Bild zeigt wie eine Kerze mit einem dünnen Lichtbündel von hinten beleuchtet wird. Eine Linse wird benutzt. Zeigt sich auf der Mattscheibe der Kerzenstumpen? Bitte begründe deine Antwort:

.....

.....

.....

12B. Kannst Du eine Kerze, die nicht brennt, in einem völlig dunklen Raum sehen? Bitte erkläre deine Antwort:

.....

.....

.....

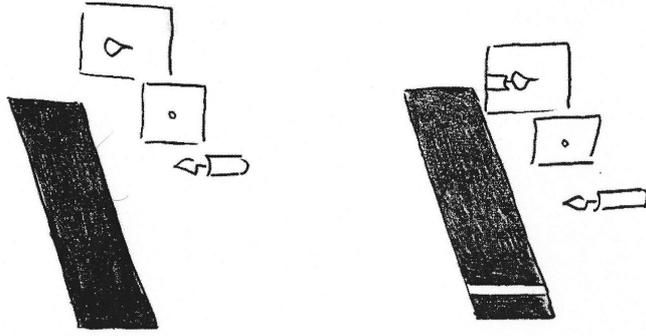
.....

13B. Was passiert mit den Lichtbündeln, wenn die Lichtbündel auf der Mattscheibe ankommen?

.....

.....

.....



14B. In einem dunklen Raum wird eine Kerzenflamme mit einem Loch abgebildet. Auf dem Schirm ist nur die Kerzenflamme zu sehen. Das geschlossene Fenster wird jetzt eine Spaltbreite geöffnet. Auf der Mattscheibe zeigt sich jetzt auch der Kerzenstumpfen. Bitte ergänze die untere Zeichnung so, dass die Beobachtung erklärt wird.

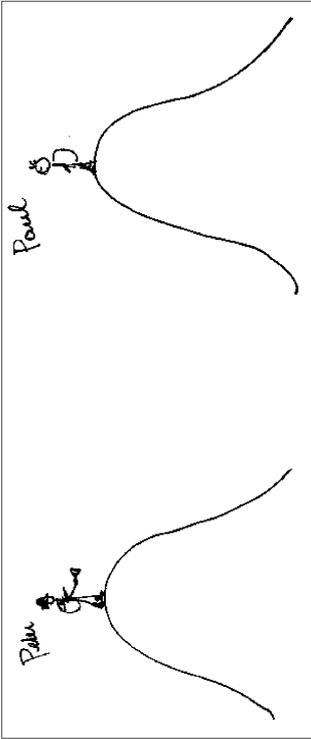
D.6 Spezieller Wissenstest (T₃) - Items der Auswertung

1. Wie würden Physikerinnen und Physiker die folgende Frage beantworten?

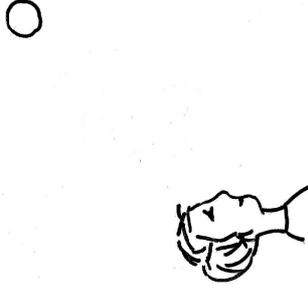
Peter und Paul entfernen sich auf ihrem Wanderweg voneinander und gehen jeder auf einen Berg. Peter schaltet jetzt seine Taschenlampe ein.

Kreuze bitte an:

- Das Licht ist im gleichen Augenblick bei Paul.
- Das Licht benötigt etwas Zeit, um Paul zu erreichen.
- Ich weiß nicht.



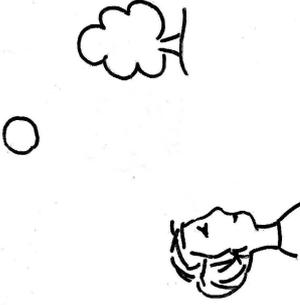
2. Auf dem Bild siehst du ein Kind und die Sonne. Zeichne ein und beschreibe, wie es dazu kommt, dass das Kind die Sonne sieht.



.....

.....

Zeichne ein und beschreibe, wie es dazu kommt, dass das Kind den Baum sieht.



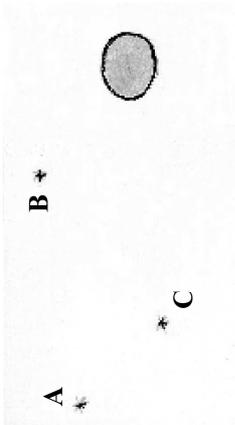
.....

.....

3. Wie würden Physikerinnen und Physiker die folgende Frage beantworten?

Stell dir vor, Donald Duck schaltet die Sonne an. Welcher Stern erblickt die Sonne zuerst? Kreuze bitte an:

- C, B, A
- A, C, B
- B, C, A



Das Licht kommt im gleichen Moment bei den Sternen an.

Begründe deine Antwort:

.....
.....

4. Wie würden Physikerinnen und Physiker die folgenden Fragen beantworten?

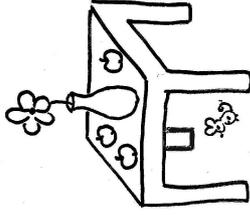
A) Kreuze bitte die Aussage an, die du dann für richtig hältst:

- Das Licht kommt zuerst bei der Blume, dann bei den Äpfeln an.
- Das Licht kommt zuerst bei den Äpfeln, dann auf dem Tisch an.
- Das Licht kommt im gleichen Moment bei allen Gegenständen an.

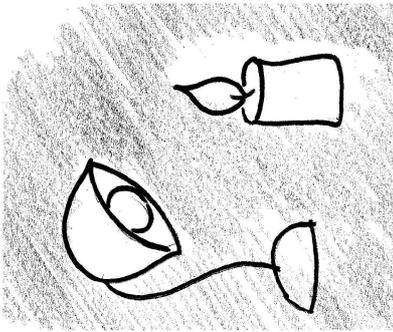


B) Auf dem Bild sitzt unter dem Tisch eine Maus. Kommt auch Licht zur Maus? Begründe deine Antwort:

.....
.....



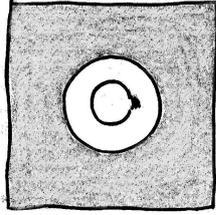
5. Das Licht der Lampe wird an dem Kerzenstumpf gestreut oder man sagt auch reflektiert. Zeichne dies ein.



Erkläre bitte, was du mit Streuung oder Reflektion meinst:

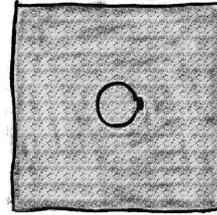
.....

6. Eine Glühlampe wird in einem dunklen Raum angeschaltet. Die Abbildung zeigt einen ersten Schritt der Lichtausbreitung:

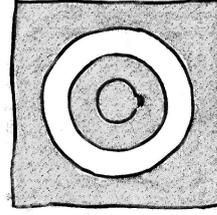


Die Lampe wird abgeschaltet. Welches Bild passt besser, um einen zweiten Schritt darzustellen? Kreuze bitte an:

a)



b)



weiß nicht

E Ergebnisse

E.1 Beliebtheit der Schulfächer

	Rangfolge der beliebtesten Schulfächer (Angabe in %)					
	Gesamt		Mädchen		Jungen	
1	Sport	49,1	Französisch	45,5	Sport	61,7
2	Mathematik	37,3	Kunst	41,8	Mathematik	44,7
3	Französisch	30,5	Englisch	38,2	Biologie	27,7
			Sport	38,1		
4	Kunst	29,4	Mathematik	31,0	Chemie	21,2
5	Englisch	27,5	Deutsch	23,6	Geschichte	17,0
					LER	17,0
6	Biologie	24,6	Biologie	21,9	Erdkunde	15,0
					Kunst	15,0
7	Deutsch	19,7	Musik	20,0	Englisch	14,9
8	Musik	14,7	Geschichte	10,9	Deutsch	14,8
9	Geschichte	13,7	Erdkunde	9,1	Französisch	12,8
	Chemie	13,8			Physik	12,8
10	Erdkunde	11,8	Physik	7,2	Musik	8,5
			Chemie	7,2		
11	Physik	9,8	LER	3,6	Informatik	2,1
	LER	9,8				
12	Informatik	1,0				

Tabelle E.1-1: Rangfolge der beliebtesten Schulfächer für die Gesamtstichprobe, sowie Mädchen und Jungen (Angabe in %, LER: Lebensgestaltung-Ethik-Religionskunde).

	Rangfolge der unbeliebtesten Schulfächer (Angabe in %)					
	Gesamt		Mädchen		Jungen	
1	Physik	50,9	Physik	63,6	Französisch	48,9
2	Französisch	31,3	Mathematik	30,9	Englisch	38,4
	Musik	31,3	Musik	30,8		
3	Mathematik	29,4	Geschichte	29,2	Physik	36,2
4	Englisch	24,5	Sport	25,5	Musik	32,0
5	Geschichte	23,6	Chemie	23,6	Mathematik	27,7
6	Chemie	20,6	Erdkunde	18,1	Deutsch	21,3
7	Sport	17,6	Französisch	16,4	Chemie	17,1
					Geschichte	17,0
					Kunst	17,0
8	Deutsch	15,6	Englisch	12,8	Biologie	10,7
			Kunst	12,7	Erdkunde	10,6
9	Erdkunde	14,7	Deutsch	10,9	Sport	8,5
	Kunst	14,7				
10	Biologie	7,8	Biologie	5,4		
11	LER	2,0	LER	3,6		

Tabelle E.1-2: Rangfolge der unbeliebtesten Schulfächer für die Gesamtstichprobe, sowie Mädchen und Jungen (Angabe in %).

E.2 Akzeptanz des Lernprogramms

Im Folgenden werden die Kategoriensysteme zur Akzeptanz des Lernprogramms (LP) dargestellt. Die einstelligen Ziffern charakterisieren die Kategorien, die zweistelligen Zahlen die Unterkategorien. Da Mehrfachnennungen möglich waren, steht N_1 bzw. N_2 für die Anzahl aller Äußerungen im ersten bzw. im zweiten Teil des Lernprogramms. Die Tabellen E.2-1 und E.2-2 enthalten weiterhin den Vergleich von absoluten und relativen Häufigkeiten (Angaben in Prozent) in einzelnen Hauptkategorien und den Vergleich von absoluten Häufigkeiten der Unterkategorien. Die Prozentangaben in Klammern beziehen sich auf die Stichprobengröße ($N=102$).

Ziffer	Positive Äußerungen Kategorien und ihre Unterkategorien	1. Teil des LP N ₁ =187	2. Teil des LP N ₂ =165
1	Verstehen	101 (99%)	77 (76%)
11	einfache / gute / verständliche Erklärungen, gut / leicht zu verstehen / nicht viele Fremdwörter	42	37
12	deutlich erklärt, logisch erzählt	4	2
13	guter Umfang: nicht zu lang / nicht so viel Text / kurz und knapp gefasst	4	5
14	Schritt für Schritt / ausführlich / genau erklärt	14	11
15	Text-Bild-Bezug: Bilder passen zum Text, Text <u>und</u> Bild, Animation ist auf die Stimme angepasst	12	5
16	Bilder helfen beim Verstehen / anschaulich erklärt / verständliche / einfache Bilder	25	17
2	Visualisierungen	36 (35%)	41 (40%)
21	gute Bilder / Zeichnungen	18	17
22	bunte / schöne Bilder	4	4
23	viele Bilder, fast immer ein Bild	3	5
24	teilweise Fotos statt Zeichnungen	-	7
25	tolle Animationen / bewegte Bilder	11	8
3	„Organizer“	1 (1%)	7 (7%)
31	Zusammenfassung, Wiederholungen	1	7
4	Gestaltung	39 (38%)	24 (24%)
41	guter Aufbau, gute Struktur des Lernprogramms	2	1
42	man kann hören, muss nicht lesen, es gibt ein Erzähler	16	11
43	deutlich und langsam gesprochen, gute Stimme	5	4
44	man kann noch mal nachlesen	16	8
5	Instruktion	3 (3%)	4 (4%)
51	Arbeit am PC	1	1
52	jeder hat sein eigenes Tempo, genug Zeit zum Mitschreiben	2	2
53	Notizen	-	1
6	Positive Zustimmung	6 (6%)	9 (9%)
61	alles / macht Spaß / freundlich, interessant / einfach klasse!	6	9
7	Sonstiges	1 (1%)	3 (3%)
91	keine Angabe	0	4

Tabelle E.2-1: Kategoriensystem zur Auswertung der Frage: „Was gefällt Dir an dem Lernprogramm zur Lochkamera?“

Ziffer	Negative Äußerungen Kategorien und ihre Unterkategorien	1. Teil des LP N ₁ =55	2. Teil des LP N ₂ =44
1	Verstehen	13 (13%)	9 (9%)
11	zu viel Stoff auf einmal, der Text ist sehr lang / zu kompliziert	8	5
12	es wurden Fragen gestellt / man muss nachdenken	3	2
13	redundant, zu viele Wiederholungen	-	1
14	unverständlich, schwer zu verstehen, nicht gut erklärt	2	1
2	Visualisierungen	4 (4%)	5 (5%)
21	zu einfache Bilder, die Bilder sind nur gezeichnet, nicht sehr ansprechend	3	2
22	fehlende Animationen	1	2
23	mehr Fotos, weniger „Comics“	-	1
3	Gestaltung	16 (16%)	12 (12%)
31	Stimme zu schnell	6	3
32	Stimme zu langsam, monoton	2	3
33	Stimme undeutlich, leise, gestottert	2	1
34	Navigation: man kann nicht jederzeit vorwärts und rückwärts gehen	4	3
35	die Stimme / Texte kann man nicht mehrmals anhören, anhalten	2	2
4	Instruktion	8 (8%)	4 (4%)
41	Notizen, Aufschreiben	2	1
42	fehlendes Experimentieren	4	1
43	Aufgaben fehlen	2	2
5	Ablehnung	6 (6%)	8 (8%)
51	(manchmal) langweilig, uninteressant	5	7
52	kindisch, für Dumme	1	1
6	Keine Kritik („Ich finde alles toll“)	13	13
7	Sonstiges (z.B. Hintergrundfarbe als „Erinnerungstütze“)	8 (8%)	6 (6%)
91	keine Angabe	39	50

Tabelle E.2-2: Kategoriensystem zur Auswertung der Frage: „Was gefällt Dir nicht an dem Lernprogramm zur Lochkamera?“

E.3 Wissenserwerb

Um die Lernzuwächse in einzelnen Treatmentgruppen zu vergleichen, werden ihre deskriptiven Statistiken aufgeführt. Es werden die folgenden Abkürzungen verwendet: M-Mittelwert, SD-Standardabweichung, VT-Vortest, NT-Nachtest, LT-Langzeittest.

Treatment	N $\Sigma=102$	1. Nachtest (NT ₁)						1. Langzeittest (LT ₁)					
		Behalten		Transfer		Gesamt		Behalten		Transfer		Gesamt	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
B + N	24	3,3	1,2	3,6	1,7	6,9	2,5	2,1	1	3,6	1,7	5,8	2,5
B + kN	28	3,2	1,3	3,5	1,7	6,7	2,7	2,4	1,4	3,5	1,9	5,8	2,9
A + N	24	3,8	1	4,1	1,8	8	2,5	3	1,3	4,1	1,6	7,1	2,6
A + kN	26	3,2	1,1	3,7	1,8	6,9	2,3	2,5	1,1	3,4	1,6	5,9	2,2

Tabelle E.3-1, a): Deskriptive Statistiken des Lernerfolgs im Wissenstest zum ersten Teil des Lernprogramms (T₁) für die vier Treatmentgruppen.

Treatment	N $\Sigma=102$	2. Nachtest (NT ₂)						2. Langzeittest (LT ₂)					
		Behalten		Transfer		Gesamt		Behalten		Transfer		Gesamt	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
B + N	24	4,8	1,2	3	1,6	7,8	2,2	3,3	1,6	2,9	1,5	6,2	2,7
B + kN	28	4,1	1,5	3,5	1,6	7,6	2,7	3,4	1,4	3	1,7	6,4	2,6
A + N	24	4,9	0,9	3,5	1,9	8,3	2,4	3,2	1,2	3,2	2	6,4	2,6
A + kN	26	4,5	1,3	3,3	1,4	7,9	2,5	3,1	1,4	3	1,4	6,2	2,6

Tabelle E.3-1, b): Deskriptive Statistiken des Lernerfolgs im Wissenstest zum zweiten Teil des Lernprogramms (T₂) für die vier Treatmentgruppen.

Treatment	N $\Sigma=102$	Vortest (VT ₃)		3. Nachtest (NT ₃)		3. Langzeittest (LT ₃)	
		M	SD	M	SD	M	SD
B + N	24	3,6	2,4	5,2	3,1	4,5	2,9
B + kN	28	3,7	2,1	5,9	2,8	5,3	2,9
A + N	24	3,8	2,4	6	2,5	5,1	2,8
A + kN	26	3,2	2	4,6	2,1	4,7	2,8

Tabelle E.3-1, c): Deskriptive Statistiken des Lernerfolgs im „speziellen Wissenstest“ (T₃) für die vier Treatmentgruppen.

Kommentar:

Im Folgenden sollen die deskriptiven Statistiken (M-Mittelwert, %-Prozentangabe des Mittelwerts, SD-Standardabweichung) des Lernerfolgs in den Wissenstests T_1 , T_2 , T_3 für alle Treatmentgruppen der Hauptuntersuchung zusammengefasst werden. Es handelt sich dabei um gerundete Werte. Zur besseren Übersicht der Ergebnisse sind diejenigen Mittelwerte dem Signifikanzniveau entsprechend markiert (* entspricht $p < 0,05$, ** steht für $p < 0,01$, *** bedeutet $p < 0,001$, Tendenz (t) liegt im Bereich $p \text{ in } \langle 0,05; 1 \rangle$), die durch statistisch relevante Unterschiede in der Analyse gestützt werden (Kapitel 9). In dem Vergleich der Treatmentgruppen, die sich im Vorwissen signifikant unterscheiden, wird VT_3 mit fetten Schriftschnitt markiert, seine Mittelwerte jedoch ohne * aufgeführt. In diesen Tabellen sind nur signifikanten Ergebnisse nach der Kovarianzanalyse mit dem Vorwissen (VT_3) aufgeführt. Es werden weiterhin die Effekte in Form von mathematischen Ungleichungen aufgeführt, wie z.B. $A > B$ lies „Animation ist förderlicher als Bild“.

Effekte	Bild				Animation			
	(N = 52)	M	%	SD	(N = 50)	M	%	SD
$A > B$	Nachtest:				Nachtest:			
	Behalten_NT ₁	3,3	65,0	1,2	Behalten_NT ₁	3,5	69,6	1,1
	Behalten_NT ₂	4,5	74,3	1,4	Behalten_NT ₂	4,7	78,3	1,1
	Transfer_NT ₁	3,6	50,9	1,7	Transfer_NT ₁	3,9	56,0	1,8
	Transfer_NT ₂	3,2	53,8	1,6	Transfer_NT ₂	3,4	56,3	1,6
	Gesamt_NT ₁	6,8	56,8	2,6	Gesamt_NT ₁	7,4	61,7	2,4
	Gesamt_NT ₂	7,7	64,1	2,5	Gesamt_NT ₂	8,1	67,3	2,4
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,3*	45,0	1,2	Behalten_LT ₁	2,7*	54,8	1,2
	Behalten_LT ₂	3,4	55,8	1,5	Behalten_LT ₂	3,1	52,3	1,3
	Transfer_LT ₁	3,5	50,6	1,8	Transfer_LT ₁	3,7	53,4	1,6
	Transfer_LT ₂	3,0	49,7	1,6	Transfer_LT ₂	3,1	52,0	1,7
	Gesamt_LT ₁	5,8	48,3	2,7	Gesamt_LT ₁	6,5	54,0	2,4
	Gesamt_LT ₂	6,3	52,8	2,6	Gesamt_LT ₂	6,3	52,2	2,6
	VT_3	3,7	36,5	2,2	VT_3	3,5	35,2	2,2
	NT_3	5,6	55,8	3,0	NT_3	5,2	52,4	2,4
	LT_3	5,0	49,6	2,9	LT_3	4,9	49,2	2,7

Tabelle E.3-2: Einfluss der Visualisierungsart auf den Lernerfolg.

Effekte	keine Notizen				Notizen			
	(N = 54)	M	%	SD	(N = 48)	M	%	SD
	Nachttest:				Nachttest:			
N > kN	Behalten_NT ₁	3,2*	63,4	1,2	Behalten_NT ₁	3,6*	71,6	1,1
N > kN	Behalten_NT ₂	4,3*	72,2	1,4	Behalten_NT ₂	4,9*	80,8	1,0
	Transfer_NT ₁	3,6	51,9	1,8	Transfer_NT ₁	3,9	55,0	1,8
	Transfer_NT ₂	3,4	56,5	1,5	Transfer_NT ₂	3,2	53,5	1,8
	Gesamt_NT ₁	6,8	56,7	2,5	Gesamt_NT ₁	7,4	62,0	2,5
	Gesamt_NT ₂	7,7	64,3	2,6	Gesamt_NT ₂	8,1	67,2	2,3
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,4	48,8	1,3	Behalten_LT ₁	2,5	50,8	1,2
	Behalten_LT ₂	3,3	54,3	1,4	Behalten_LT ₂	3,2	53,8	1,4
	Transfer_LT ₁	3,4	49,0	1,7	Transfer_LT ₁	3,9	55,4	1,7
	Transfer_LT ₂	3,0	50,7	1,5	Transfer_LT ₂	3,1	51,0	1,7
	Gesamt_LT ₁	5,9	48,9	2,5	Gesamt_LT ₁	6,4	53,3	2,6
	Gesamt_LT ₂	6,3	52,5	2,6	Gesamt_LT ₂	6,3	52,4	2,6
	VT ₃	3,5	34,6	2,1	VT ₃	3,7	37,3	2,4
	NT ₃	5,3	52,6	2,6	NT ₃	5,6	55,8	2,9
	LT ₃	5,0	50,4	2,8	LT ₃	4,8	48,3	2,8

Tabelle E.3-3: Einfluss der Anfertigung von Notizen auf den Lernerfolg. Vergleich der Schülergruppen, die mit Notizen bzw. ohne Notizen gearbeitet haben.

Effekte	Mädchen				Jungen			
	(N = 55)	M	%	SD	(N = 47)	M	%	SD
	Nachttest:				Nachttest:			
	Behalten_NT ₁	3,3	65,0	1,2	Behalten_NT ₁	3,5	69,8	1,1
	Behalten_NT ₂	4,8	80,0	1,0	Behalten_NT ₂	4,3	72,0	1,4
	Transfer_NT ₁	3,7	52,4	1,9	Transfer_NT ₁	3,8	54,4	1,7
	Transfer_NT ₂	3,1	51,5	1,7	Transfer_NT ₂	3,6	59,2	1,5
	Gesamt_NT ₁	6,9	57,8	2,6	Gesamt_NT ₁	7,3	60,8	2,4
	Gesamt_NT ₂	7,9	65,8	2,3	Gesamt_NT ₂	7,9	65,6	2,6
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,4	47,6	1,2	Behalten_LT ₁	2,6	52,4	1,2
	Behalten_LT ₂	3,4	56,7	1,3	Behalten_LT ₂	3,1	51,0	1,5
	Transfer_LT ₁	3,5	50,1	1,7	Transfer_LT ₁	3,8	54,1	1,7
	Transfer_LT ₂	3,0	49,7	1,6	Transfer_LT ₂	3,1	52,2	1,7
	Gesamt_LT ₁	5,9	49,1	2,6	Gesamt_LT ₁	6,4	53,3	2,5
	Gesamt_LT ₂	6,4	53,2	2,4	Gesamt_LT ₂	6,2	51,6	2,8
J > M	VT₃	3,1	31,1	2,1	VT₃	4,2	41,5	2,3
	NT₃	4,6*	46,4	2,5	NT₃	6,3*	63,2	2,7
	LT ₃	4,3	42,9	2,7	LT ₃	5,7	57,0	2,7

Tabelle E.3-4: Vergleich der Mädchen- und Jungengruppe im Wissenserwerb. Der signifikante Unterschied im NT₃ bleibt nach der Kovarianzanalyse mit der Kovariate VT₃ erhalten.

	Mädchen				Jungen			
B	(N = 27)	M	%	SD	(N = 25)	M	%	SD
	Nachtest:				Nachtest:			
	Behalten_NT ₁	3,2	64,4	1,3	Behalten_NT ₁	3,3	65,6	1,1
	Behalten_NT ₂	4,8*	80,2	1,0	Behalten_NT ₂	4,1*	68,0	1,6
	Transfer_NT ₁	3,4	48,1	1,7	Transfer_NT ₁	3,8	53,7	1,6
	Transfer_NT ₂	3,0	49,3	1,7	Transfer_NT ₂	3,5	58,7	1,5
	Gesamt_NT ₁	6,6	54,9	2,8	Gesamt_NT ₁	7,0	58,7	2,4
	Gesamt_NT ₂	7,8	64,8	2,4	Gesamt_NT ₂	7,6	63,3	2,6
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,0	39,2	1,1	Behalten_LT ₁	2,6	51,2	1,3
	Behalten_LT ₂	3,5	58,0	1,3	Behalten_LT ₂	3,2	53,3	1,6
	Transfer_LT ₁	3,4	48,1	1,9	Transfer_LT ₁	3,7	53,1	1,7
	Transfer_LT ₂	2,8	46,8	1,7	Transfer_LT ₂	3,2	52,7	1,4
	Gesamt_LT ₁	5,3	44,4	2,7	Gesamt_LT ₁	6,3	52,3	2,5
	Gesamt_LT ₂	6,3	52,5	2,5	Gesamt_LT ₂	6,4	53,0	2,8
	VT ₃	3,2	31,5	2,1	VT ₃	4,2	42,0	2,3
	NT ₃	4,5*	44,8	3,1	NT ₃	6,8*	67,6	2,4
	LT ₃	4,1	40,1	2,7	LT ₃	5,9	59,2	2,8
A	(N = 28)	M	%	SD	(N = 22)	M	%	SD
	Nachtest:				Nachtest:			
	Behalten_NT ₁	3,3	65,8	1,1	Behalten_NT ₁	3,7	74,6	1,1
	Behalten_NT ₂	4,8	79,8	1,0	Behalten_NT ₂	4,6	76,5	1,3
	Transfer_NT ₁	4,0	56,6	2,0	Transfer_NT ₁	3,9	55,1	1,7
	Transfer_NT ₂	3,2	53,5	1,6	Transfer_NT ₂	3,6	59,8	1,7
	Gesamt_NT ₁	7,3	60,4	2,5	Gesamt_NT ₁	7,6	63,3	2,4
	Gesamt_NT ₂	8,0	66,7	2,3	Gesamt_NT ₂	8,2	68,2	2,7
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,8	55,8	1,2	Behalten_LT ₁	2,7	53,6	1,2
	Behalten_LT ₂	3,3	55,3	1,3	Behalten_LT ₂	2,9	48,5	1,4
	Transfer_LT ₁	3,6	52,0	1,6	Transfer_LT ₁	3,9	55,1	1,7
	Transfer_LT ₂	3,1	52,3	1,5	Transfer_LT ₂	3,1	51,5	2,0
	Gesamt_LT ₁	6,4	53,6	2,3	Gesamt_LT ₁	6,6	54,6	2,6
	Gesamt_LT ₂	6,5	53,8	2,4	Gesamt_LT ₂	6,0	50,0	2,9
	VT ₃	3,1	30,7	2,1	VT ₃	4,1	40,9	2,3
	NT ₃	4,8	47,9	1,8	NT ₃	5,8	58,2	3,0
	LT ₃	4,5	45,0	2,7	LT ₃	5,5	54,5	2,7

Tabelle E.3-5: Vergleich der Geschlechter innerhalb der Bild- (M_B vs. J_B) und Animationsgruppe (M_A vs. J_A) in Bezug auf den Wissenserwerb.

	Bild				Animation			
♀	(N = 27)	M	%	SD	(N = 28)	M	%	SD
	Nachtest:				Nachtest:			
	Behalten_NT ₁	3,2	64,4	1,3	Behalten_NT ₁	3,3	65,8	1,1
	Behalten_NT ₂	4,8	80,2	1,0	Behalten_NT ₂	4,8	79,8	1,0
	Transfer_NT ₁	3,4	48,1	1,7	Transfer_NT ₁	4,0	56,6	2,0
	Transfer_NT ₂	3,0	49,3	1,7	Transfer_NT ₂	3,2	53,5	1,6
	Gesamt_NT ₁	6,6	54,9	2,8	Gesamt_NT ₁	7,3	60,4	2,5
	Gesamt_NT ₂	7,8	64,8	2,4	Gesamt_NT ₂	8,0	66,7	2,3
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,0**	39,2	1,1	Behalten_LT ₁	2,8**	55,8	1,2
	Behalten_LT ₂	3,5	58,0	1,3	Behalten_LT ₂	3,3	55,3	1,3
	Transfer_LT ₁	3,4	48,1	1,9	Transfer_LT ₁	3,6	52,0	1,6
	Transfer_LT ₂	2,8	46,8	1,7	Transfer_LT ₂	3,1	52,3	1,5
	Gesamt_LT ₁	5,3	44,4	2,7	Gesamt_LT ₁	6,4	53,6	2,3
	Gesamt_LT ₂	6,3	52,5	2,5	Gesamt_LT ₂	6,5	53,8	2,4
	VT ₃	3,2	31,5	2,1	VT ₃	3,1	30,7	2,1
	NT ₃	4,5	44,8	3,1	NT ₃	4,8	47,9	1,8
	LT ₃	4,1	40,1	2,7	LT ₃	4,5	45,0	2,7
	♂	(N = 25)	M	%	SD	(N = 22)	M	%
Nachtest:					Nachtest:			
Behalten_NT ₁		3,3	65,6	1,1	Behalten_NT ₁	3,7	74,6	1,1
Behalten_NT ₂		4,1	68,0	1,6	Behalten_NT ₂	4,6	76,5	1,3
Transfer_NT ₁		3,8	53,7	1,6	Transfer_NT ₁	3,9	55,1	1,7
Transfer_NT ₂		3,5	58,7	1,5	Transfer_NT ₂	3,6	59,8	1,7
Gesamt_NT ₁		7,0	58,7	2,4	Gesamt_NT ₁	7,6	63,3	2,4
Gesamt_NT ₂		7,6	63,3	2,6	Gesamt_NT ₂	8,2	68,2	2,7
Langzeittest:					Langzeittest:			
Behalten_LT ₁		2,6	51,2	1,3	Behalten_LT ₁	2,7	53,6	1,2
Behalten_LT ₂		3,2	53,3	1,6	Behalten_LT ₂	2,9	48,5	1,4
Transfer_LT ₁		3,7	53,1	1,7	Transfer_LT ₁	3,9	55,1	1,7
Transfer_LT ₂		3,2	52,7	1,4	Transfer_LT ₂	3,1	51,5	2,0
Gesamt_LT ₁		6,3	52,3	2,5	Gesamt_LT ₁	6,6	54,6	2,6
Gesamt_LT ₂		6,4	53,0	2,8	Gesamt_LT ₂	6,0	50,0	2,9
VT ₃		4,2	42,0	2,3	VT ₃	4,1	40,9	2,3
NT ₃		6,8	67,6	2,4	NT ₃	5,8	58,2	3,0
LT ₃		5,9	59,2	2,8	LT ₃	5,5	54,5	2,7

Tabelle E.3-6: Vergleich der visuellen Repräsentationen innerhalb der Mädchen- (M_B vs. M_A) und Jungengruppe (J_B vs. J_A) in Bezug auf den Wissenserwerb.

	Mädchen				Jungen			
kN	(N = 29)	M	%	SD	(N = 25)	M	%	SD
	Nachttest:				Nachttest:			
	Behalten_NT ₁	3,2	64,2	1,2	Behalten_NT ₁	3,1	62,4	1,1
	Behalten_NT ₂	4,8**	80,5	1,0	Behalten_NT ₂	3,8**	62,7	1,6
	Transfer_NT ₁	3,8	53,7	1,8	Transfer_NT ₁	3,5	49,7	1,8
	Transfer_NT ₂	3,5	58,7	1,5	Transfer_NT ₂	3,2	54,0	1,6
	Gesamt_NT ₁	7,0	58,1	2,5	Gesamt_NT ₁	6,6	55,0	2,5
	Gesamt_NT ₂	8,3 (t)	69,5	2,3	Gesamt_NT ₂	7,0 (t)	58,3	2,8
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,4	48,2	1,2	Behalten_LT ₁	2,5	49,6	1,3
	Behalten_LT ₂	3,5	57,5	1,5	Behalten_LT ₂	3,0	50,7	1,3
	Transfer_LT ₁	3,5	49,7	1,8	Transfer_LT ₁	3,4	48,0	1,6
	Transfer_LT ₂	3,2	52,8	1,6	Transfer_LT ₂	2,9	48,0	1,4
	Gesamt_LT ₁	5,9	49,2	2,6	Gesamt_LT ₁	5,8	48,7	2,4
	Gesamt_LT ₂	6,6	55,2	2,7	Gesamt_LT ₂	5,9	49,3	2,4
	VT ₃	3,2	31,7	1,9	VT ₃	3,8	38,0	2,2
	NT ₃	5,0	49,7	2,4	NT ₃	5,6	56,0	2,8
	LT ₃	4,6	46,2	3,0	LT ₃	5,5	55,2	2,6
N	(N = 26)	M	%	SD	(N = 22)	M	%	SD
	Nachttest:				Nachttest:			
	Behalten_NT ₁	3,3	66,2	1,2	Behalten_NT ₁	3,9	78,2	1,0
	Behalten_NT ₂	4,8	79,5	1,0	Behalten_NT ₂	5,0	82,5	1,0
	Transfer_NT ₁	3,6	51,1	2,0	Transfer_NT ₁	4,2	59,7	1,4
	Transfer_NT ₂	2,6*	43,7	1,8	Transfer_NT ₂	3,9*	65,2	1,5
	Gesamt_NT ₁	6,9	57,3	2,8	Gesamt_NT ₁	8,1	67,4	2,0
	Gesamt_NT ₂	7,4 (t)	61,5	2,2	Gesamt_NT ₂	8,9 (t)	73,8	2,1
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,4	47,0	1,2	Behalten_LT ₁	2,8	55,4	1,2
	Behalten_LT ₂	3,4	55,8	1,0	Behalten_LT ₂	3,1	51,5	1,8
	Transfer_LT ₁	3,5	50,6	1,6	Transfer_LT ₁	4,3	61,0	1,7
	Transfer_LT ₂	2,8	46,2	1,6	Transfer_LT ₂	3,4	56,8	1,9
	Gesamt_LT ₁	5,9	49,0	2,5	Gesamt_LT ₁	7,1	58,8	2,5
	Gesamt_LT ₂	6,1	51,0	2,0	Gesamt_LT ₂	6,5	54,2	3,2
	VT ₃	3,0	30,4	2,2	VT ₃	4,6	45,5	2,3
	NT ₃	4,3**	42,7	2,5	NT ₃	7,1**	71,4	2,4
	LT ₃	3,9	39,2	2,4	LT ₃	5,9	59,1	2,9

Tabelle E.3-7: Vergleich der Geschlechter innerhalb der Notizengruppe (M_N vs. J_N) und der Gruppe ohne Notizen (M_{kN} vs. J_{kN}).

	keine Notizen				Notizen				
♀	(N = 29)	M	%	SD	(N = 26)	M	%	SD	
	Nachtest:				Nachtest:				
	Behalten_NT ₁	3,2	64,2	1,2	Behalten_NT ₁	3,3	66,2	1,2	
	Behalten_NT ₂	4,8	80,5	1,0	Behalten_NT ₂	4,8	79,5	1,0	
	Transfer_NT ₁	3,8	53,7	1,8	Transfer_NT ₁	3,6	51,1	2,0	
	Transfer_NT ₂	3,5*	58,7	1,5	Transfer_NT ₂	2,6*	43,7	1,8	
	Gesamt_NT ₁	7,0	58,1	2,5	Gesamt_NT ₁	6,9	57,3	2,8	
	Gesamt_NT ₂	8,3	69,5	2,3	Gesamt_NT ₂	7,4	61,5	2,2	
	Langzeittest:				Langzeittest:				
	Behalten_LT ₁	2,4	48,2	1,2	Behalten_LT ₁	2,4	47,0	1,2	
	Behalten_LT ₂	3,5	57,5	1,5	Behalten_LT ₂	3,4	55,8	1,0	
	Transfer_LT ₁	3,5	49,7	1,8	Transfer_LT ₁	3,5	50,6	1,6	
	Transfer_LT ₂	3,2	52,8	1,6	Transfer_LT ₂	2,8	46,2	1,6	
	Gesamt_LT ₁	5,9	49,2	2,6	Gesamt_LT ₁	5,9	49,0	2,5	
	Gesamt_LT ₂	6,6	55,2	2,7	Gesamt_LT ₂	6,1	51,0	2,0	
	VT ₃	3,2	31,7	1,9	VT ₃	3,0	30,4	2,2	
	NT ₃	5,0	49,7	2,4	NT ₃	4,3	42,7	2,5	
	LT ₃	4,6	46,2	3,0	LT ₃	3,9	39,2	2,4	
	♂	(N = 25)	M	%	SD	(N = 22)	M	%	SD
		Nachtest:				Nachtest:			
Behalten_NT ₁		3,1*	62,4	1,1	Behalten_NT ₁	3,9*	78,2	1,0	
Behalten_NT ₂		3,8**	62,7	1,6	Behalten_NT ₂	5,0**	82,5	1,0	
Transfer_NT ₁		3,5	49,7	1,8	Transfer_NT ₁	4,2	59,7	1,4	
Transfer_NT ₂		3,2	54,0	1,6	Transfer_NT ₂	3,9	65,2	1,5	
Gesamt_NT ₁		6,6 (t)	55,0	2,5	Gesamt_NT ₁	8,1 (t)	67,4	2,0	
Gesamt_NT ₂		7,0*	58,3	2,8	Gesamt_NT ₂	8,9*	73,8	2,1	
Langzeittest:					Langzeittest:				
Behalten_LT ₁		2,5	49,6	1,3	Behalten_LT ₁	2,8	55,4	1,2	
Behalten_LT ₂		3,0	50,7	1,3	Behalten_LT ₂	3,1	51,5	1,8	
Transfer_LT ₁		3,4	48,0	1,6	Transfer_LT ₁	4,3	61,0	1,7	
Transfer_LT ₂		2,9	48,0	1,4	Transfer_LT ₂	3,4	56,8	1,9	
Gesamt_LT ₁		5,8	48,7	2,4	Gesamt_LT ₁	7,1	58,8	2,5	
Gesamt_LT ₂		5,9	49,3	2,4	Gesamt_LT ₂	6,5	54,2	3,2	
VT₃		3,8	38,0	2,2	VT₃	4,6	45,5	2,3	
NT ₃		5,6	56,0	2,8	NT ₃	7,1	71,4	2,4	
LT ₃		5,5	55,2	2,6	LT ₃	5,9	59,1	2,9	

Tabelle E.3-8: Einfluss der Anfertigung von Notizen innerhalb von Mädchen- (M_{kN} vs. M_N) und Jungengruppe (J_{kN} vs. J_N) auf den Lernerfolg.

Niedriges RV				Hohes RV			
(N = 47)	M	%	SD	(N = 40)	M	%	SD
Nachtest:				Nachtest:			
Behalten_NT ₁	2,9***	57,4	1,2	Behalten_NT ₁	3,8***	76,6	1,0
Behalten_NT ₂	4,2**	69,5	1,4	Behalten_NT ₂	5,0**	82,5	1,1
Transfer_NT ₁	3,1***	43,7	1,8	Transfer_NT ₁	4,3***	61,4	1,5
Transfer_NT ₂	3,0 (t)	50,3	1,5	Transfer_NT ₂	3,6 (t)	60,5	1,8
Gesamt_NT ₁	5,9***	49,5	2,6	Gesamt_NT ₁	8,1***	67,8	2,0
Gesamt_NT ₂	7,2**	59,9	2,5	Gesamt_NT ₂	8,6**	71,5	2,4
Langzeittest:				Langzeittest:			
Behalten_LT ₁	2,1**	41,8	1,2	Behalten_LT ₁	2,8**	55,6	1,1
Behalten_LT ₂	2,8**	46,2	1,5	Behalten_LT ₂	3,6**	60,0	1,2
Transfer_LT ₁	3,0**	43,4	1,7	Transfer_LT ₁	4,1**	58,6	1,5
Transfer_LT ₂	2,7*	45,3	1,5	Transfer_LT ₂	3,5*	58,0	1,5
Gesamt_LT ₁	5,1***	42,8	2,5	Gesamt_LT ₁	6,9***	57,3	2,3
Gesamt_LT ₂	5,5**	45,8	2,4	Gesamt_LT ₂	7,1**	59,0	2,4
VT ₃	3,5	34,7	2,1	VT ₃	3,6	35,8	2,1
NT ₃	4,7*	47,2	2,8	NT ₃	6,2*	61,5	2,5
LT ₃	4,1**	41,1	2,6	LT ₃	5,9**	59,3	2,6

Tabelle E.3-9: Vergleich der Schülergruppen mit niedrigem und hohem räumlichen Vorstellungsvermögen in Bezug auf den Wissenserwerb.

	Bild				Animation			
RV-	(N = 23)	M	%	SD	(N = 24)	M	%	SD
	Nachtest:				Nachtest:			
	Behalten_NT1	2,7	53,0	1,4	Behalten_NT1	3,1	61,6	1,0
	Behalten_NT2	3,7*	61,7	1,5	Behalten_NT2	4,6*	77,2	1,1
	Transfer_NT1	2,8	39,7	1,8	Transfer_NT1	3,3	47,6	1,8
	Transfer_NT2	2,5*	42,0	1,4	Transfer_NT2	3,5*	58,3	1,5
	Gesamt_NT1	5,4	45,3	2,8	Gesamt_NT1	6,4	53,5	2,3
	Gesamt_NT2	6,2**	51,8	2,4	Gesamt_NT2	8,1**	67,8	2,4
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT1	1,5***	29,6	0,9	Behalten_LT1	2,7***	53,4	1,2
	Behalten_LT2	2,6	42,8	1,5	Behalten_LT2	3,0	49,3	1,4
	Transfer_LT1	2,9	41,0	1,8	Transfer_LT1	3,2	45,9	1,6
	Transfer_LT2	2,4	39,2	1,4	Transfer_LT2	3,1	51,3	1,6
	Gesamt_LT1	4,4*	36,3	2,5	Gesamt_LT1	5,9*	49,0	2,3
	Gesamt_LT2	4,9	40,9	2,4	Gesamt_LT2	6,0	50,3	2,3
	VT3	3,5	34,8	2,3	VT3	3,5	34,6	2,0
	NT3	4,6	45,7	3,0	NT3	4,9	48,8	2,5
	LT3	3,7	37,0	2,6	LT3	4,5	45,0	2,7
RV+	(N = 20)	M	%	SD	(N = 20)	M	%	SD
	Nachtest:				Nachtest:			
	Behalten_NT1	3,8	75,0	0,9	Behalten_NT1	3,9	78,0	1,1
	Behalten_NT2	5,1	85,0	0,9	Behalten_NT2	4,8	80,0	1,2
	Transfer_NT1	4,1	57,9	1,3	Transfer_NT1	4,6	65,0	1,7
	Transfer_NT2	3,9	64,2	1,7	Transfer_NT2	3,4	56,7	1,9
	Gesamt_NT1	7,8	65,0	1,7	Gesamt_NT1	8,5	70,4	2,3
	Gesamt_NT2	9,0	74,6	1,9	Gesamt_NT2	8,2	68,3	2,8
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT1	2,8	55,0	1,1	Behalten_LT1	2,8	56,0	1,1
	Behalten_LT2	3,8	63,3	1,1	Behalten_LT2	3,4	56,7	1,4
	Transfer_LT1	3,9	55,7	1,4	Transfer_LT1	4,3	61,4	1,6
	Transfer_LT2	3,5	57,5	1,2	Transfer_LT2	3,5	58,3	1,8
	Gesamt_LT1	6,7	55,4	2,1	Gesamt_LT1	7,1	59,2	2,4
	Gesamt_LT2	7,3	60,4	1,8	Gesamt_LT2	6,9	57,5	2,9
	VT3	3,6	36,0	1,9	VT3	3,6	35,5	2,4
	NT3	6,2	62,0	2,8	NT3	6,1	61,0	2,2
	LT3	5,9	59,0	2,8	LT3	6,0	59,5	2,5

Tabelle E.3-10: Vergleich der visuellen Repräsentationen innerhalb der Gruppe mit niedrigem (RV_{B-} vs. RV_{A-}) und hohem räumlichen Vorstellungsvermögen (RV_{B+} vs. RV_{A-}).

	niedriges RV				hohes RV			
B	(N = 23)	M	%	SD	(N = 20)	M	%	SD
	Nachttest:				Nachttest:			
	Behalten_NT ₁	2,7*	53,0	1,4	Behalten_NT ₁	3,8*	75,0	0,9
	Behalten_NT ₂	3,7***	61,7	1,5	Behalten_NT ₂	5,1***	85,0	0,9
	Transfer_NT ₁	2,8*	39,7	1,8	Transfer_NT ₁	4,1*	57,9	1,3
	Transfer_NT ₂	2,5**	42,0	1,4	Transfer_NT ₂	3,9**	64,2	1,7
	Gesamt_NT ₁	5,4**	45,3	2,8	Gesamt_NT ₁	7,8**	65,0	1,7
	Gesamt_NT ₂	6,2***	51,8	2,4	Gesamt_NT ₂	9,0***	74,6	1,9
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	1,5***	29,6	0,9	Behalten_LT ₁	2,8***	55,0	1,1
	Behalten_LT ₂	2,6**	42,8	1,5	Behalten_LT ₂	3,8**	63,3	1,1
	Transfer_LT ₁	2,9*	41,0	1,8	Transfer_LT ₁	3,9*	55,7	1,4
	Transfer_LT ₂	2,4**	39,2	1,4	Transfer_LT ₂	3,5**	57,5	1,2
	Gesamt_LT ₁	4,4**	36,3	2,5	Gesamt_LT ₁	6,7**	55,4	2,1
	Gesamt_LT ₂	4,9***	40,9	2,4	Gesamt_LT ₂	7,3***	60,4	1,8
	VT ₃	3,5	34,8	2,3	VT ₃	3,6	36,0	1,9
	NT ₃	4,6 (t)	45,7	3,0	NT ₃	6,2 (t)	62,0	2,8
	LT ₃	3,7*	37,0	2,6	LT ₃	5,9*	59,0	2,8
A	(N = 24)	M	%	SD	(N = 20)	M	%	SD
	Nachttest:				Nachttest:			
	Behalten_NT ₁	3,1**	61,6	1,0	Behalten_NT ₁	3,9**	78,0	1,1
	Behalten_NT ₂	4,6	77,2	1,1	Behalten_NT ₂	4,8	80,0	1,2
	Transfer_NT ₁	3,3*	47,6	1,8	Transfer_NT ₁	4,6*	65,0	1,7
	Transfer_NT ₂	3,5	58,3	1,5	Transfer_NT ₂	3,4	56,7	1,9
	Gesamt_NT ₁	6,4**	53,5	2,3	Gesamt_NT ₁	8,5**	70,4	2,3
	Gesamt_NT ₂	8,1	67,8	2,4	Gesamt_NT ₂	8,2	68,3	2,8
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,7	53,4	1,2	Behalten_LT ₁	2,8	56,0	1,1
	Behalten_LT ₂	3,0	49,3	1,4	Behalten_LT ₂	3,4	56,7	1,4
	Transfer_LT ₁	3,2*	45,9	1,6	Transfer_LT ₁	4,3*	61,4	1,6
	Transfer_LT ₂	3,1	51,3	1,6	Transfer_LT ₂	3,5	58,3	1,8
	Gesamt_LT ₁	5,9 (t)	49,0	2,3	Gesamt_LT ₁	7,1 (t)	59,2	2,4
	Gesamt_LT ₂	6,0	50,3	2,3	Gesamt_LT ₂	6,9	57,5	2,9
	VT ₃	3,5	34,6	2,0	VT ₃	3,6	35,5	2,4
	NT ₃	4,9 (t)	48,8	2,5	NT ₃	6,1 (t)	61,0	2,2
	LT ₃	4,5 (t)	45,0	2,7	LT ₃	6,0 (t)	59,5	2,5

Tabelle E.3-11: Vergleich der Schülergruppen mit niedrigem und hohem räumlichen Vorstellungsvermögen innerhalb der Bild- (RV_{B-} vs. RV_{B+}) und Animationsgruppe (RV_{A-} vs. RV_{B+}).

	keine Notizen				Notizen			
RV-	(N = 23)	M	%	SD	(N = 24)	M	%	SD
	Nachttest:				Nachttest:			
	Behalten_NT ₁	2,6	51,4	1,1	Behalten_NT ₁	3,2	63,4	1,2
	Behalten_NT ₂	3,9	64,5	1,6	Behalten_NT ₂	4,5	74,3	1,1
	Transfer_NT ₁	3,0	43,4	1,8	Transfer_NT ₁	3,1	44,0	1,7
	Transfer_NT ₂	3,2	53,7	1,3	Transfer_NT ₂	2,8	47,2	1,7
	Gesamt_NT ₁	5,6	46,8	2,6	Gesamt_NT ₁	6,3	52,1	2,6
	Gesamt_NT ₂	7,1	59,1	2,7	Gesamt_NT ₂	7,3	60,8	2,4
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,0	40,8	1,2	Behalten_LT ₁	2,1	42,6	1,3
	Behalten_LT ₂	3,0	49,3	1,6	Behalten_LT ₂	2,6	43,0	1,4
	Transfer_LT ₁	2,8	39,1	1,6	Transfer_LT ₁	3,3	47,6	1,8
	Transfer_LT ₂	3,0	49,3	1,3	Transfer_LT ₂	2,5	41,7	1,8
	Gesamt_LT ₁	4,8	39,8	2,2	Gesamt_LT ₁	5,5	45,5	2,8
	Gesamt_LT ₂	5,9	49,3	2,4	Gesamt_LT ₂	5,1	42,3	2,4
	VT ₃	3,4	34,3	2,1	VT ₃	3,5	35,0	2,2
	NT ₃	5,2	51,7	2,7	NT ₃	4,3	42,9	2,8
	LT ₃	4,8	48,3	2,6	LT ₃	3,4	34,2	2,6
RV+	(N = 22)	M	%	SD	(N = 18)	M	%	SD
	Nachttest:				Nachttest:			
	Behalten_NT ₁	3,6	71,8	1,1	Behalten_NT ₁	4,1	82,2	0,8
	Behalten_NT ₂	4,6 (t)	77,3	1,3	Behalten_NT ₂	5,3 (t)	88,8	0,6
	Transfer_NT ₁	4,0	56,4	1,4	Transfer_NT ₁	4,7	67,4	1,5
	Transfer_NT ₂	3,6	59,2	1,8	Transfer_NT ₂	3,7	62,0	1,8
	Gesamt_NT ₁	7,6*	62,9	2,0	Gesamt_NT ₁	8,8*	73,6	1,8
	Gesamt_NT ₂	8,2	68,2	2,7	Gesamt_NT ₂	9,1	75,5	1,9
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,6	51,0	1,2	Behalten_LT ₁	3,1	61,2	0,9
	Behalten_LT ₂	3,4	56,8	1,4	Behalten_LT ₂	3,8	63,8	1,0
	Transfer_LT ₁	3,7 (t)	52,6	1,5	Transfer_LT ₁	4,6 (t)	65,9	1,3
	Transfer_LT ₂	3,3	55,3	1,6	Transfer_LT ₂	3,7	61,2	1,4
	Gesamt_LT ₁	6,2 (t)	51,9	2,4	Gesamt_LT ₁	7,7 (t)	63,9	1,8
	Gesamt_LT ₂	6,7	56,1	2,8	Gesamt_LT ₂	7,5	62,5	1,7
	VT ₃	3,1	31,4	1,7	VT ₃	4,1	41,1	2,4
	NT ₃	5,5*	54,5	2,6	NT ₃	7,0*	70,0	2,2
	LT ₃	5,4	54,1	2,8	LT ₃	6,6	65,6	2,3

Tabelle E.3-12: Auswirkung der Anfertigung von Notizen innerhalb der Gruppe mit niedrigem (RV_{KN-} vs. RV_{N-}) und hohem räumlichen Vorstellungsvermögen (RV_{KN+} vs. RV_{N+}).

	niedriges RV				hohes RV			
kN	(N = 23)	M	%	SD	(N = 22)	M	%	SD
	Nachttest:				Nachttest:			
	Behalten_NT ₁	2,6**	51,4	1,1	Behalten_NT ₁	3,6**	71,8	1,1
	Behalten_NT ₂	3,9 (t)	64,5	1,6	Behalten_NT ₂	4,6 (t)	77,3	1,3
	Transfer_NT ₁	3,0 (t)	43,4	1,8	Transfer_NT ₁	4,0 (t)	56,4	1,4
	Transfer_NT ₂	3,2	53,7	1,3	Transfer_NT ₂	3,6	59,2	1,8
	Gesamt_NT ₁	5,6**	46,8	2,6	Gesamt_NT ₁	7,6**	62,9	2,0
	Gesamt_NT ₂	7,1	59,1	2,7	Gesamt_NT ₂	8,2	68,2	2,7
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,0	40,8	1,2	Behalten_LT ₁	2,6	51,0	1,2
	Behalten_LT ₂	3,0	49,3	1,6	Behalten_LT ₂	3,4	56,8	1,4
	Transfer_LT ₁	2,8*	39,1	1,6	Transfer_LT ₁	3,7*	52,6	1,5
	Transfer_LT ₂	3,0	49,3	1,3	Transfer_LT ₂	3,3	55,3	1,6
	Gesamt_LT ₁	4,8*	39,8	2,2	Gesamt_LT ₁	6,2*	51,9	2,4
	Gesamt_LT ₂	5,9	49,3	2,4	Gesamt_LT ₂	6,7	56,1	2,8
	VT ₃	3,4	34,3	2,1	VT ₃	3,1	31,4	1,7
	NT ₃	5,2	51,7	2,7	NT ₃	5,5	54,5	2,6
	LT ₃	4,8	48,3	2,6	LT ₃	5,4	54,1	2,8
N	(N = 24)	M	%	SD	(N = 18)	M	%	SD
	Nachttest:				Nachttest:			
	Behalten_NT ₁	3,2**	63,4	1,2	Behalten_NT ₁	4,1**	82,2	0,8
	Behalten_NT ₂	4,5**	74,3	1,1	Behalten_NT ₂	5,3**	88,8	0,6
	Transfer_NT ₁	3,1**	44,0	1,7	Transfer_NT ₁	4,7**	67,4	1,5
	Transfer_NT ₂	2,8	47,2	1,7	Transfer_NT ₂	3,7	62,0	1,8
	Gesamt_NT ₁	6,3***	52,1	2,6	Gesamt_NT ₁	8,8***	73,6	1,8
	Gesamt_NT ₂	7,3*	60,8	2,4	Gesamt_NT ₂	9,1*	75,5	1,9
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,1*	42,6	1,3	Behalten_LT ₁	3,1*	61,2	0,9
	Behalten_LT ₂	2,6**	43,0	1,4	Behalten_LT ₂	3,8**	63,8	1,0
	Transfer_LT ₁	3,3*	47,6	1,8	Transfer_LT ₁	4,6*	65,9	1,3
	Transfer_LT ₂	2,5*	41,7	1,8	Transfer_LT ₂	3,7*	61,2	1,4
	Gesamt_LT ₁	5,5**	45,5	2,8	Gesamt_LT ₁	7,7**	63,9	1,8
	Gesamt_LT ₂	5,1***	42,3	2,4	Gesamt_LT ₂	7,5***	62,5	1,7
	VT ₃	3,5	35,0	2,2	VT ₃	4,1	41,1	2,4
	NT ₃	4,3**	42,9	2,8	NT ₃	7,0**	70,0	2,2
	LT ₃	3,4***	34,2	2,6	LT ₃	6,6***	65,6	2,3

Tabelle E.3-13: Vergleich der Schülergruppen mit niedrigem und hohem räumlichen Vorstellungsvermögen innerhalb der Notizengruppe (RV_{N-} vs. RV_{N+}) und der Gruppe ohne Notizen (RV_{kN-} vs. RV_{kN+}).

Niedrige SF				Hohe SF			
(N = 48)	M	%	SD	(N = 54)	M	%	SD
Nachttest:				Nachttest:			
Behalten_NT ₁	3,0*	60,4	1,3	Behalten_NT ₁	3,7*	73,4	0,9
Behalten_NT ₂	4,3*	72,2	1,2	Behalten_NT ₂	4,8*	80,0	1,2
Transfer_NT ₁	3,2*	45,9	1,9	Transfer_NT ₁	4,2*	60,0	1,5
Transfer_NT ₂	3,0	49,3	1,5	Transfer_NT ₂	3,6	60,2	1,7
Gesamt_NT ₁	6,2**	51,9	2,7	Gesamt_NT ₁	7,9**	65,6	2,1
Gesamt_NT ₂	7,3*	60,8	2,3	Gesamt_NT ₂	8,4*	70,1	2,5
Langzeittest:				Langzeittest:			
Behalten_LT ₁	2,3	45,8	1,3	Behalten_LT ₁	2,7	53,4	1,1
Behalten_LT ₂	3,0	50,0	1,4	Behalten_LT ₂	3,5	57,7	1,3
Transfer_LT ₁	3,1*	44,0	1,7	Transfer_LT ₁	4,1*	59,0	1,6
Transfer_LT ₂	2,8	45,8	1,6	Transfer_LT ₂	3,3	55,2	1,6
Gesamt_LT ₁	5,4*	44,8	2,6	Gesamt_LT ₁	6,8*	56,7	2,3
Gesamt_LT ₂	5,8	47,9	2,5	Gesamt_LT ₂	6,8	56,5	2,6
VT₃	3,1	30,8	1,9	VT₃	4,0	40,4	2,4
NT ₃	4,8	48,1	2,6	NT ₃	5,9	59,4	2,7
LT ₃	4,2*	41,7	2,6	LT ₃	5,6*	56,3	2,8

Tabelle E.3-14: Vergleich der Schülergruppen mit niedrigen und hohen sprachlichen Fähigkeiten in Bezug auf den Wissenserwerb. Die signifikanten Unterschiede sind entsprechend der Kovarianzanalyse mit der Kovariate VT₃ markiert.

	Niedrige SF				Hohe SF			
B	(N = 24)	M	%	SD	(N = 28)	M	%	SD
	Nachttest:				Nachttest:			
	Behalten_NT ₁	2,9*	57,6	1,3	Behalten_NT ₁	3,6*	71,4	1,0
	Behalten_NT ₂	4,3	71,5	1,4	Behalten_NT ₂	4,6	76,8	1,4
	Transfer_NT ₁	3,0*	42,9	2,0	Transfer_NT ₁	4,0*	57,7	1,2
	Transfer_NT ₂	2,8 (t)	46,5	1,3	Transfer_NT ₂	3,6 (t)	60,2	1,8
	Gesamt_NT ₁	5,9	49,0	3,0	Gesamt_NT ₁	7,6	63,4	1,9
	Gesamt_NT ₂	7,1 (t)	59,0	2,3	Gesamt_NT ₂	8,2 (t)	68,4	2,5
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,0	40,0	1,3	Behalten_LT ₁	2,5	49,2	1,2
	Behalten_LT ₂	3,4	56,3	1,5	Behalten_LT ₂	3,3	55,3	1,5
	Transfer_LT ₁	2,9*	41,1	1,8	Transfer_LT ₁	4,1*	58,7	1,6
	Transfer_LT ₂	2,7	44,5	1,6	Transfer_LT ₂	3,3	54,2	1,5
	Gesamt_LT ₁	4,9*	40,7	2,6	Gesamt_LT ₁	6,6*	54,8	2,5
	Gesamt_LT ₂	6,0	50,3	2,6	Gesamt_LT ₂	6,6	54,8	2,6
	VT ₃	3,1	31,3	1,9	VT ₃	4,1	41,1	2,4
	NT ₃	4,8 (t)	47,5	3,1	NT ₃	6,3 (t)	62,9	2,7
	LT ₃	4,2 (t)	42,1	2,8	LT ₃	5,6 (t)	56,1	2,8
A	(N = 24)	M	%	SD	(N = 26)	M	%	SD
	Nachttest:				Nachttest:			
	Behalten_NT ₁	3,2 (t)	63,4	1,2	Behalten_NT ₁	3,8 (t)	75,4	0,8
	Behalten_NT ₂	4,4*	73,0	1,1	Behalten_NT ₂	5,0*	83,3	1,0
	Transfer_NT ₁	3,4 (t)	48,9	1,9	Transfer_NT ₁	4,4 (t)	62,6	1,7
	Transfer_NT ₂	3,1	52,2	1,6	Transfer_NT ₂	3,6	60,3	1,7
	Gesamt_NT ₁	6,6*	54,8	2,4	Gesamt_NT ₁	8,2*	67,9	2,3
	Gesamt_NT ₂	7,5	62,5	2,3	Gesamt_NT ₂	8,6	71,8	2,5
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,6	51,6	1,3	Behalten_LT ₁	2,9	57,6	1,1
	Behalten_LT ₂	2,6**	43,8	1,3	Behalten_LT ₂	3,6**	60,3	1,2
	Transfer_LT ₁	3,3 (t)	47,0	1,5	Transfer_LT ₁	4,2 (t)	59,3	1,6
	Transfer_LT ₂	2,8	47,2	1,6	Transfer_LT ₂	3,4	56,3	1,7
	Gesamt_LT ₁	5,9 (t)	49,0	2,5	Gesamt_LT ₁	7,0 (t)	58,7	2,2
	Gesamt_LT ₂	5,5*	45,5	2,4	Gesamt_LT ₂	7,0*	58,3	2,5
	VT ₃	3,0	30,4	2,1	VT ₃	4,0	39,6	2,3
	NT ₃	4,9	48,8	2,1	NT ₃	5,6	55,8	2,7
	LT ₃	4,1*	41,3	2,6	LT ₃	5,7*	56,5	2,8

Tabelle E.3-15: Vergleich der Schülergruppen mit niedrigen und hohen sprachlichen Fähigkeiten innerhalb der Bild- (SF_B⁻ vs. SF_B⁺) und Animationsgruppe (SF_A⁻ vs. SF_A⁺).

	Bild				Animation			
SF-	(N = 24)	M	%	SD	(N = 24)	M	%	SD
	Nachtest:				Nachtest:			
	Behalten_NT ₁	2,9	57,6	1,3	Behalten_NT ₁	3,2	63,4	1,2
	Behalten_NT ₂	4,3	71,5	1,4	Behalten_NT ₂	4,4	73,0	1,1
	Transfer_NT ₁	3,0	42,9	2,0	Transfer_NT ₁	3,4	48,9	1,9
	Transfer_NT ₂	2,8	46,5	1,3	Transfer_NT ₂	3,1	52,2	1,6
	Gesamt_NT ₁	5,9	49,0	3,0	Gesamt_NT ₁	6,6	54,8	2,4
	Gesamt_NT ₂	7,1	59,0	2,3	Gesamt_NT ₂	7,5	62,5	2,3
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,0	40,0	1,3	Behalten_LT ₁	2,6	51,6	1,3
	Behalten_LT ₂	3,4	56,3	1,5	Behalten_LT ₂	2,6	43,8	1,3
	Transfer_LT ₁	2,9	41,1	1,8	Transfer_LT ₁	3,3	47,0	1,5
	Transfer_LT ₂	2,7	44,5	1,6	Transfer_LT ₂	2,8	47,2	1,6
	Gesamt_LT ₁	4,9	40,7	2,6	Gesamt_LT ₁	5,9	49,0	2,5
	Gesamt_LT ₂	6,0	50,3	2,6	Gesamt_LT ₂	5,5	45,5	2,4
	VT ₃	3,1	31,3	1,9	VT ₃	3,0	30,4	2,1
	NT ₃	4,8	47,5	3,1	NT ₃	4,9	48,8	2,1
	LT ₃	4,2	42,1	2,8	LT ₃	4,1	41,3	2,6
SF+	(N = 28)	M	%	SD	(N = 26)	M	%	SD
	Nachtest:				Nachtest:			
	Behalten_NT ₁	3,6	71,4	1,0	Behalten_NT ₁	3,8	75,4	0,8
	Behalten_NT ₂	4,6	76,8	1,4	Behalten_NT ₂	5,0	83,3	1,0
	Transfer_NT ₁	4,0	57,7	1,2	Transfer_NT ₁	4,4	62,6	1,7
	Transfer_NT ₂	3,6	60,2	1,8	Transfer_NT ₂	3,6	60,3	1,7
	Gesamt_NT ₁	7,6	63,4	1,9	Gesamt_NT ₁	8,2	67,9	2,3
	Gesamt_NT ₂	8,2	68,4	2,5	Gesamt_NT ₂	8,6	71,8	2,5
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,5	49,2	1,2	Behalten_LT ₁	2,9	57,6	1,1
	Behalten_LT ₂	3,3	55,3	1,5	Behalten_LT ₂	3,6	60,3	1,2
	Transfer_LT ₁	4,1	58,7	1,6	Transfer_LT ₁	4,2	59,3	1,6
	Transfer_LT ₂	3,3	54,2	1,5	Transfer_LT ₂	3,4	56,3	1,7
	Gesamt_LT ₁	6,6	54,8	2,5	Gesamt_LT ₁	7,0	58,7	2,2
	Gesamt_LT ₂	6,6	54,8	2,6	Gesamt_LT ₂	7,0	58,3	2,5
	VT ₃	4,1	41,1	2,4	VT ₃	4,0	39,6	2,3
	NT ₃	6,3	62,9	2,7	NT ₃	5,6	55,8	2,7
	LT ₃	5,6	56,1	2,8	LT ₃	5,7	56,5	2,8

Tabelle E.3-16: Vergleich der visuellen Repräsentationen innerhalb der Gruppe mit niedrigen (SF_{B-} vs. SF_{A-}) und hohen sprachlichen Fähigkeiten (SF_{B+} vs. SF_{A+}).

	keine Notizen				Notizen			
SF-	(N = 24)	M	%	SD	(N = 24)	M	%	SD
	Nachttest:				Nachttest:			
	Behalten_NT ₁	2,8	55,0	1,3	Behalten_NT ₁	3,3	65,8	1,3
	Behalten_NT ₂	4,0 (t)	66,7	1,4	Behalten_NT ₂	4,7 (t)	77,8	1,0
	Transfer_NT ₁	3,3	46,4	2,0	Transfer_NT ₁	3,2	45,3	1,9
	Transfer_NT ₂	2,8	47,2	1,3	Transfer_NT ₂	3,1	51,3	1,7
	Gesamt_NT ₁	6,0	50,0	2,7	Gesamt_NT ₁	6,5	53,8	2,7
	Gesamt_NT ₂	6,8	56,9	2,3	Gesamt_NT ₂	7,8	64,6	2,3
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,0	40,0	1,6	Behalten_LT ₁	2,6	51,6	1,2
	Behalten_LT ₂	2,8	47,2	1,5	Behalten_LT ₂	3,2	52,8	1,4
	Transfer_LT ₁	2,6*	36,9	1,6	Transfer_LT ₁	3,6*	51,1	1,6
	Transfer_LT ₂	2,6	43,0	1,5	Transfer_LT ₂	2,9	48,7	1,8
	Gesamt_LT ₁	4,6*	38,2	2,4	Gesamt_LT ₁	6,2*	51,4	2,6
	Gesamt_LT ₂	5,4	45,2	2,5	Gesamt_LT ₂	6,1	50,7	2,6
	VT ₃	2,8	27,5	1,9	VT ₃	3,4	34,2	2,0
	NT ₃	4,7	46,7	2,4	NT ₃	5,0	49,6	2,8
	LT ₃	4,0	40,0	2,5	LT ₃	4,3	43,3	2,8
	SF+	(N = 30)	M	%	SD	(N = 24)	M	%
Nachttest:				Nachttest:				
Behalten_NT ₁		3,5	70,0	1,0	Behalten_NT ₁	3,9	77,6	0,9
Behalten_NT ₂		4,6	76,7	1,4	Behalten_NT ₂	5,0	84,0	1,0
Transfer_NT ₁		3,9	56,1	1,6	Transfer_NT ₁	4,5	64,9	1,3
Transfer_NT ₂		3,8	63,8	1,6	Transfer_NT ₂	3,3	55,5	1,8
Gesamt_NT ₁		7,4 (t)	61,9	2,1	Gesamt_NT ₁	8,4 (t)	70,2	1,9
Gesamt_NT ₂		8,4	70,3	2,6	Gesamt_NT ₂	8,4	69,8	2,3
Langzeittest:				Langzeittest:				
Behalten_LT ₁		2,8	56,0	1,1	Behalten_LT ₁	2,5	50,0	1,2
Behalten_LT ₂		3,6	60,0	1,2	Behalten_LT ₂	3,3	54,8	1,5
Transfer_LT ₁		4,1	58,6	1,5	Transfer_LT ₁	4,2	59,6	1,7
Transfer_LT ₂		3,4	56,7	1,5	Transfer_LT ₂	3,2	53,5	1,7
Gesamt_LT ₁		6,9	57,5	2,1	Gesamt_LT ₁	6,7	55,6	2,6
Gesamt_LT ₂		7,0	58,3	2,5	Gesamt_LT ₂	6,5	54,2	2,7
VT ₃		4,0	40,3	2,1	VT ₃	4,0	40,4	2,7
NT ₃		5,7	57,3	2,6	NT ₃	6,2	62,1	2,8
LT ₃		5,9	58,7	2,8	LT ₃	5,3	53,3	2,7

Tabelle E.3-17: Auswirkung der Anfertigung von Notizen innerhalb der Gruppe mit niedrigen (SF_{KN-} vs. SF_{N-}) und hohen sprachlichen Fähigkeiten (SF_{KN+} vs. SF_{N+}).

	niedrige SF				hohe SF			
kN	(N = 24)	M	%	SD	(N = 30)	M	%	SD
	Nachttest:				Nachttest:			
	Behalten_NT ₁	2,8 (t)	55,0	1,3	Behalten_NT ₁	3,5 (t)	70,0	1,0
	Behalten_NT ₂	4,0	66,7	1,4	Behalten_NT ₂	4,6	76,7	1,4
	Transfer_NT ₁	3,3	46,4	2,0	Transfer_NT ₁	3,9	56,1	1,6
	Transfer_NT ₂	2,8	47,2	1,3	Transfer_NT ₂	3,8	63,8	1,6
	Gesamt_NT ₁	6,0	50,0	2,7	Gesamt_NT ₁	7,4	61,9	2,1
	Gesamt_NT ₂	6,8	56,9	2,3	Gesamt_NT ₂	8,4	70,3	2,6
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,0	40,0	1,6	Behalten_LT ₁	2,8	56,0	1,1
	Behalten_LT ₂	2,8	47,2	1,5	Behalten_LT ₂	3,6	60,0	1,2
	Transfer_LT ₁	2,6**	36,9	1,6	Transfer_LT ₁	4,1**	58,6	1,5
	Transfer_LT ₂	2,6	43,0	1,5	Transfer_LT ₂	3,4	56,7	1,5
	Gesamt_LT ₁	4,6**	38,2	2,4	Gesamt_LT ₁	6,9**	57,5	2,1
	Gesamt_LT ₂	5,4	45,2	2,5	Gesamt_LT ₂	7,0	58,3	2,5
	VT₃	2,8	27,5	1,9	VT₃	4,0	40,3	2,1
	NT ₃	4,7	46,7	2,4	NT ₃	5,7	57,3	2,6
	LT ₃	4,0	40,0	2,5	LT ₃	5,9	58,7	2,8
N	(N = 24)	M	%	SD	(N = 24)	M	%	SD
	Nachttest:				Nachttest:			
	Behalten_NT ₁	3,3	65,8	1,3	Behalten_NT ₁	3,9	77,6	0,9
	Behalten_NT ₂	4,7	77,8	1,0	Behalten_NT ₂	5,0	84,0	1,0
	Transfer_NT ₁	3,2**	45,3	1,9	Transfer_NT ₁	4,5**	64,9	1,3
	Transfer_NT ₂	3,1	51,3	1,7	Transfer_NT ₂	3,3	55,5	1,8
	Gesamt_NT ₁	6,5**	53,8	2,7	Gesamt_NT ₁	8,4**	70,2	1,9
	Gesamt_NT ₂	7,8	64,6	2,3	Gesamt_NT ₂	8,4	69,8	2,3
	Langzeittest:				Langzeittest:			
	Behalten_LT ₁	2,6	51,6	1,2	Behalten_LT ₁	2,5	50,0	1,2
	Behalten_LT ₂	3,2	52,8	1,4	Behalten_LT ₂	3,3	54,8	1,5
	Transfer_LT ₁	3,6	51,1	1,6	Transfer_LT ₁	4,2	59,6	1,7
	Transfer_LT ₂	2,9	48,7	1,8	Transfer_LT ₂	3,2	53,5	1,7
	Gesamt_LT ₁	6,2	51,4	2,6	Gesamt_LT ₁	6,7	55,6	2,6
	Gesamt_LT ₂	6,1	50,7	2,6	Gesamt_LT ₂	6,5	54,2	2,7
	VT₃	3,4	34,2	2,0	VT₃	4,0	40,4	2,7
	NT ₃	5,0	49,6	2,8	NT ₃	6,2	62,1	2,8
	LT ₃	4,3	43,3	2,8	LT ₃	5,3	53,3	2,7

Tabelle E.3-18: Vergleich der Gruppen mit niedrigen und hohe sprachlichen Fähigkeiten innerhalb der Notizengruppe (SF_{N-} vs. SF_{N+}) und der Gruppe ohne Notizen (SF_{kN-} vs. SF_{kN+}).

E.4 Kontrollvariablen

Kontrollvariablen	Bild (N = 52)		Animation (N = 50)	
	M _B	SD _B	M _A	SD _A
Physiknote	2,6	0,8	2,8	0,9
Deutschnote	2,2	0,8	2,2	0,6
Gender (%)				
♀	51,9		56,0	
♂	48,1		44,0	
Beliebtestes Fach (%)				
Ph	9,5		10,0	
Ma	42,3		32,0	
De	23,1		16,0	
Unbeliebtestes Fach (%)				
Ph	53,9		48,0	
Ma	25,0		34,0	
De	15,4		16,0	
TV-Sendungen zur Physik (%)				
oft	5,8		6,0	
gelegentlich	73,1		66,0	
nie	21,2		28,0	
P-Skala	13,5	2,9	14,0	2,0
S-Skala	18,0	3,1	18,2	3,4
RV	17,1	3,2	17,2	3,1
SF	15,3	4,1	15,2	3,2
VT ₃ (Punktzahl)	3,7	2,2	3,5	2,2

Tabelle E.4-1: Vergleich der Kontrollvariablen von Bild- und Animationsgruppe anhand den Ergebnissen des Vortests.

Bildergruppe	Mädchen (N = 27)		Jungen (N = 25)	
	M _♀	SD _♀	M _♂	SD _♂
Physiknote	2,6	0,8	2,6	0,8
Deutschnote	2,0*	0,6	2,5*	1,0
TV-Sendungen zur Physik	2,0 (t)	0,3	1,7 (t)	0,6
P-Skala	13,6	3,3	13,4	2,4
S-Skala	17,4	3,0	18,6	3,0
RV	17,4	3,1	16,8	3,3
SF	14,7	3,9	16,0	4,3
VT ₃ (Punktzahl)	3,2 (t)	2,1	4,2 (t)	2,3
Animationsgruppe				
	Mädchen (N = 28)		Jungen (N = 22)	
	M _♀	SD _♀	M _♂	SD _♂
Physiknote	2,7	1,0	2,9	0,8
Deutschnote	2,2	0,7	2,3	0,6
TV-Sendungen zur Physik	1,6	0,5	2,0	0,6
P-Skala	14,3	2,0	13,7	1,9
S-Skala	17,9	3,6	18,7	3,2
RV	17,0	3,7	17,5	2,3
SF	14,9	3,6	15,6	2,8
VT ₃ (Punktzahl)	3,1	2,1	4,1	2,3

Tabelle E.4-2: Gendervergleich in der Bild- und Animationsgruppe in Bezug auf die Kontrollvariablen.

Mädchen	Bild (N = 27)		Animation (N = 28)	
	M _B	SD _B	M _A	SD _A
Physiknote	2,6	0,8	2,7	1,0
Deutschnote	2,0	0,6	2,2	0,7
TV-Sendungen zur Physik	2,0**	0,3	1,6**	0,5
P-Skala	13,6	3,3	14,3	2,0
S-Skala	17,4	3,0	17,9	3,6
RV	17,4	3,1	17,0	3,7
SF	14,7	3,9	14,9	3,6
VT ₃ (Punktzahl)	3,2	2,1	3,1	2,1
Jungen				
	Bild (N = 25)		Animation (N = 22)	
	M _B	SD _B	M _A	SD _A
Physiknote	2,6	0,8	2,9	0,8
Deutschnote	2,5	1,0	2,3	0,6
TV-Sendungen zur Physik	1,7	0,6	2,0	0,6
P-Skala	13,4	2,4	13,7	1,9
S-Skala	18,6	3,0	18,7	3,2
RV	16,8	3,3	17,5	2,3
SF	16,0	4,3	15,6	2,8
VT ₃ (Punktzahl)	4,2	2,3	4,1	2,3

Tabelle E.4-3: Vergleich der visuellen Repräsentationen innerhalb der Mädchen- bzw. Jungengruppe in Bezug auf die Kontrollvariablen.

Kontrollvariablen	keine Notizen (N = 54)		Notizen (N = 48)	
	M _{kN}	SD _{kN}	M _N	SD _N
Physiknote	2,9**	0,9	2,4**	0,8
Deutschnote	2,3	0,8	2,2	0,7
Gender (%)				
♀	53,7		54,2	
♂	46,3		45,8	
Beliebtstes Fach (%)				
Ph	3,8		16,7	
Ma	37,1		37,5	
De	18,6		20,8	
Unbeliebtstes Fach (%)				
Ph	53,7		47,9	
Ma	31,5		27,1	
De	18,5		12,5	
TV-Sendungen zur Physik (%)				
oft	3,7		8,3	
gelegentlich	66,7		72,9	
nie	29,6		18,8	
P-Skala	14,1	2,2	13,5	2,7
S-Skala	17,5*	3,0	18,8*	3,4
RV	17,3	3,0	17,0	3,2
SF	15,4	3,8	15,1	3,6
VT ₃ (Punktzahl)	3,5	2,1	3,7	2,4

Tabelle E.4-4: Vergleich der Kontrollvariablen von den Treatmentgruppen „Notizen“ vs. „keine Notizen“ anhand den Ergebnissen des Vortests.

keine Notizen	Mädchen (N = 29)		Jungen (N = 25)	
	M _{kN}	SD _{kN}	M _{kN}	SD _{kN}
Physiknote	2,8	0,9	3,0	0,8
Deutschnote	2,1	0,7	2,4	0,8
TV-Sendungen zur Physik	1,8	0,5	1,7	0,5
P-Skala	14,4	1,9	13,7	2,5
S-Skala	17,2	2,9	17,8	3,0
RV	17,8	3,1	16,8	2,9
SF	14,7	3,8	16,3	3,7
VT ₃ (Punktzahl)	3,2	1,9	3,8	2,2
Notizen				
Notizen	Mädchen (N = 28)		Jungen (N = 22)	
	M _N	SD _N	M _N	SD _N
Physiknote	2,4	0,8	2,4	0,7
Deutschnote	2,0	0,6	2,3	0,8
TV-Sendungen zur Physik	1,9	0,4	2,0	0,7
P-Skala	13,5	3,3	13,5	1,8
S-Skala	18,1	3,6	19,6	2,9
RV	16,5	3,6	17,5	2,8
SF	15,0	3,7	15,3	3,6
VT ₃ (Punktzahl)	3,0*	2,2	4,6*	2,3

Tabelle E.4-5: Gendervergleich in den Treatmentgruppen „keine Notizen“ und „Notizen“ in Bezug auf die Kontrollvariablen.

Mädchen	keine Notizen (N = 29)		Notizen (N = 25)	
	M _{kN}	SD _{kN}	M _N	SD _N
Physiknote	2,8	0,9	2,4	0,8
Deutschnote	2,1	0,7	2,0	0,6
TV-Sendungen zur Physik	1,8	0,5	1,9	0,4
P-Skala	14,4	1,9	13,5	3,3
S-Skala	17,2	2,9	18,1	3,6
RV	17,8	3,1	16,5	3,6
SF	14,7	3,8	15,0	3,7
VT ₃ (Punktzahl)	3,2	1,9	3,0	2,2
Jungen				
	keine Notizen (N = 25)		Notizen (N = 22)	
	M _{kN}	SD _{kN}	M _N	SD _N
Physiknote	3,0*	0,8	2,4*	0,7
Deutschnote	2,4	0,8	2,3	0,8
TV-Sendungen zur Physik	1,7	0,5	2,0	0,7
P-Skala	13,7	2,5	13,5	1,8
S-Skala	17,8*	3,0	19,6*	2,9
RV	16,8	2,9	17,5	2,8
SF	16,3	3,7	15,3	3,6
VT ₃ (Punktzahl)	3,8*	2,2	4,6*	2,3

Tabelle E.4-6: Vergleich der Instruktion „ohne Notizen“ vs. „Notizen“ innerhalb der Mädchen- und Jungengruppe in Bezug auf die Kontrollvariablen.

Abstract

Fragestellung

Es ist in der Lernpsychologie ein allgemein bekannter Befund, dass Visualisierungen eine wichtige Rolle beim Lernen spielen, weil einerseits visuelle Informationen doppelt kodiert und damit besser behalten werden und sie andererseits Vorlage für den Aufbau adäquater mentaler Modelle sind. Dabei stellt sich für die Fachdidaktik der Physik die Frage: Wie soll man ein Bild konstruieren, sodass die Schüler optimal Physik lernen können?

Außerdem können in den Lernmedien Bilder statisch oder dynamisch präsentiert werden. Hier stellt sich die Frage: Welche Form der Darstellung den Wissenserwerb von Schülern stärker unterstützt. Die bisherigen Forschungsergebnisse zur Wirkung von Animationen bzw. statischen Bildern sind uneinheitlich. Es reicht also nicht, bewegte Bilder einzusetzen; es muss die Gestaltung systematisch optimiert werden. Diesen Forschungsbedarf greift die vorliegende Arbeit auf und versucht die Bedingungen, unter denen Animationen sich positiv auf den Lernerfolg auswirken, differenzierter aufzuzeigen.

Ein anderer Faktor neben visueller Gestaltung beim Einsatz von Multimedia ist die Lerneraktivität. Dabei ist die zentrale Fragestellung: Wie soll die Verarbeitung des Lerninhalts bei den Schülern zusätzlich aktiviert werden? Von mehreren Methoden wird die Anfertigung von Notizen als weitere unabhängige Variable untersucht.

Zusammenfassend: *Wem* (Lerntyp) hilft *was* (statisches oder dynamisches Bild) *wie* (Gestaltungsprinzipien) und mit *welcher* Unterstützung des Lernprozesses (Notizen)?

Im Kontext dieser Fragestellung wurde eine empirische Untersuchung durchgeführt, bei der die Wirkung statischer bzw. dynamischer Bilder und Notizen auf den Wissenserwerb mit einem Lernprogramm zur optischen Abbildung untersucht wurde.

Methodisches Vorgehen

Nach theoretischen Vorarbeiten in der Fachdidaktik, Lern- und Wahrnehmungspsychologie, weiterhin nach zahlreichen Bildanalysen von Physikschulbüchern, wurden *Gestaltungsprinzipien* entwickelt. Die Prinzipien sollen eine pragmatische Hilfe für die Bildgestaltung liefern, um lernförderliche Bilder für das Physiklernen zu entwickeln.

Im nächsten Schritt wurde ein computerbasiertes Lernprogramm in zwei Teilen für das schulische Physiklernen geschrieben („Die optische Abbildung mit der Lochkamera I und II“). Das Lernprogramm ist gemäß dem Stand der kognitionspsychologischen und fachdidaktischen Multimediaforschung konstruiert. Die Bilder des Lernprogramms wurden anhand der Gestaltungsprinzipien entwickelt und mit Interviews und Bildbeschreibungen validiert (1. Vorstudie). Diese optimierten Bilder wurden animiert und in das Lernprogramm eingebettet. Zusätzlich zum Hauptlernziel „optische Abbildung“ wurden auch Phänomene wie die Lichtausbreitung, der physikalische Sehvorgang und die Streuung dynamisch dargestellt. Die 2. Vorstudie erfolgte zu dieser Animationsversion des Lernprogramms. Die theoriegeleitet gestalteten Animatio-

nen wurden anhand der oben erwähnten Methoden validiert. Es erfolgte also eine Optimierung der Bilder und Animationen im themenspezifischen Kontext.

Das Lernprogramm wurde zum Gegenstand der Hauptuntersuchung. Die Überprüfung der Hypothesen wurde methodisch im 2*2-Design realisiert. Die zwei unabhängigen Variablen sind „Visualisierungsart“ (Bild vs. Animation) und „Lerneraktivität“ (Anfertigung von Notizen vs. keine Notizen). Dabei ist ihre Wirkung auf den Wissenserwerb entscheidend. Die Wissenstests zum ersten und zweiten Teil des Lernprogramms sind erprobte Testinstrumente von Starauschek (2006a) im Inhaltsbereich „optische Abbildung“. Zur Messung des Wissenserwerbs von animiert dargestellten Inhalten wurde ein „spezieller Wissenstest“ entwickelt und mit Interviews von Schülern und anhand ihrer Testbearbeitung validiert (3. und 4. Vorstudie). Alle Tests enthalten Skalen zur Erhebung der Behaltens- und Transferleistung.

Die quantitative Untersuchung wurde unter quasi schulischen Bedingungen in drei Brandenburger Gymnasien mit 102 Schüler der 8. Klasse durchgeführt. Sie verlief in drei Phasen:

- Am Anfang wurde der Vortest in allen Klassen geschrieben. Der Vortest enthielt den „speziellen Wissenstest“. Es wurden zusätzlich auch Kontrollvariablen wie räumliches Vorstellungsvermögen und sprachliche Fähigkeiten erhoben. Danach wurden die Daten ausgewertet und dementsprechend die vier homogenen Gruppen gebildet.
- In der Treatmentphase haben die Probanden mit zwei Teilen des Lernprogramms gearbeitet. Nach dem jeweiligen Teil folgten die erwähnten Wissenstests.
- Nach sechs Wochen wurde der Langzeittest durchgeführt, der alle Teile des Wissenstests enthält.

Die erhaltenen Daten wurden mit quantitativen statistischen Verfahren ausgewertet, wobei der Einfluss der Lernermerkmale auf den Lernerfolg auch überprüft wurde. Die Untersuchung von Hofmann et al. (2009), die sich der Methode der Blickbewegungsanalyse bediente, lief nach dem Abschluss der Hauptuntersuchung. Ihre Ergebnisse werden hier zitiert, da sie die Wirksamkeit der entwickelten Prinzipien der Bildgestaltung bestätigen.

Ergebnisse

Die Blickbewegungsanalyse zeigt, dass Bildbereiche prägnanter Gestaltung, im Vergleich zu nicht prägnanten Bildelementen, eine erhöhte Anzahl an Fixationen erhalten. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass durch die Anwendung der Gestaltungsprinzipien die relevanten Bildinhalte zum Gegenstand der Bildauswertung werden. Die Relevanz der genauen Betrachtung von Bildern für die Behaltensleistung konnte auch bestätigt werden.

Die Animationsgruppe der Hauptuntersuchung erreicht *im Langzeittest eine bessere Behaltensleistung* als die Gruppe mit Bildern. Das Vorwissen als Kovariate verstärkt den positiven Effekt von Animationen. Wenn man die Gesamttendenz beobachtet, treten Geschlechtsunterschiede auf: Animationen sind für die Mädchen eine geeignetere Visualisierungsart als Bilder. Innerhalb der Schülergruppe mit niedrigem räumlichen Vorstellungsvermögen erreichen Schüler der Animationsgruppe einen größeren Wissenserwerb als Schüler der Bildergruppe.

Animationen können also Mängel im räumlichen Vorstellungsvermögen ausgleichen, vermutlich mittels Bereitstellung eines dynamischen mentalen Modells. Die anhand der Gestaltungsprinzipien entwickelten Animationen können also eine unterstützende Wirkung auf das Lernen der Schüler ausüben. Die Gestaltungsprinzipien können deshalb zur Optimierung der Animationen herangezogen werden.

Die Notizengruppe erreicht *kurzfristig eine bessere Behaltensleistung* als die Gruppe ohne Notizen. Dieser Effekt ist auf die Kovariaten "Physiknote", „Selbstwirksamkeitserwartung“ und die verlängerte Bearbeitungszeit zurückzuführen. Jungen mit Notizen schneiden besser ab, als Jungen ohne Notizen: Die Jungen werden durch Anfertigen von Notizen dazu gebracht, dass sie sich mehr mit den Inhalten des Lernprogramms auseinandersetzen. Die positive Wirkung des Treatments spiegelt sich dann in ihren kurzfristigen Behaltens- und Gesamtleistungen wieder. Das Schreiben von Notizen unterstützt auch Schüler mit niedrigen sprachlichen Fähigkeiten, die dadurch eine höhere langfristige Lernleistung erzielen als Schüler mit gleichen sprachlichen Fähigkeiten, die jedoch keine Notizen anfertigen. Das Schreiben von Notizen ist also als ergänzende Methode anzusehen, wodurch die Beschäftigung mit dem Lerninhalt zum Lernvorteil der Schüler verlängert werden kann.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Geburtsdatum und -ort	25. Mai 1979, Komárno, Slowakei
Familienstand	verheiratet
Geburtsname	Slančík
Staatsbürgerschaft	slowakisch
Nationalität	ungarisch
Wohnhaft	seit April 2002 in Berlin

Aus- und Weiterbildung

2009 – 2012	Universität Wien Doktoratsstudium Physik Betreuer der Dissertation: Univ.-Prof. Dr. Romano Rupp
2007 – 2012	Tanztherapie Zentrum Berlin Ausbildung zur Tanz- und Bewegungstherapeutin
1997 – 2002	Comenius Universität Bratislava Fakultät für Mathematik, Physik und Informatik Lehramt Mathematik und Physik Diplom mit akademischer Belobigung (Note: 1.0)
1993 – 1997	Hans Selye Gymnasium, Komárno Spezialisierung: Mathematik-Physik Ausgezeichnetes Abitur (Note: 1.0)

Auslandsaufenthalte im Rahmen des Studiums

WS 2001/ 2002	Universität Wien Institut für Theoretische Physik
WS 1999/ 2000	Eötvös Loránd Universität, Budapest Institut für Komplexe Systeme

Berufliche Tätigkeiten

- seit 6/ 2008 Freiberufliche Tätigkeit als Tanz- und Bewegungstherapeutin
sowie als Beraterin
Stress- und Depressionsbewältigung, Burn-Out-Prophylaxe,
Persönlichkeitsentwicklung für Privatpersonen und
Unternehmen
- seit 1/ 2010 Wir Gestalten e.V., Berlin
Projektleiterin der sozialdiakonischen Arbeit
- 4/ 2008 Universität Essen
Forschergruppe und Graduiertenkolleg
„Naturwissenschaftlicher Unterricht“
Gastforschung bei Prof. Dr. Hans E. Fischer
- 10/ 2003 – 12/ 2007 Universität Potsdam
Institut für Physik und Astronomie
Lehrstuhl Didaktik der Physik
Wissenschaftliche Mitarbeiterin (Forschung und Lehre)
Arbeitsschwerpunkt: Multimediales Lernen
- 10/ 2007 Pädagogische Hochschule Weingarten
12/ 2006 Fach Physik
Gastforschung bei Prof. Dr. Erich Starauschek
- 5/ 2002 – 8/ 2003 Technische Universität Berlin
Institut für Atomare Physik und Fachdidaktik
Tutorin mit Unterrichtsaufgaben
Arbeitsschwerpunkt: Interaktive Bildschirmexperimente
- 9/ 2001 Hans Selye Gymnasium, Komárno
Unterrichtspraktikum, Sek II
- 4/ 2001 Grundschule* Za Kasárňou, Bratislava
Unterrichtspraktikum, Sek I

* Die Grundschulen in der Slowakei enthalten außer den ersten 4 Klassen auch die Sekundarstufe I.

Publikationen

- 2009 Berger, K., Starauschek, E.
 „Wie erkennt und erstellt man gute Bilder?“
 Einige Regeln zur Gestaltung von Bildern für das Physiklernen“
 Naturwissenschaften im Unterricht (NiU-Physik), Themenheft „Bilder“, 1/09
- 2007 Berger, K., Starauschek, E. & Mikelskis, H.F.
 „Wirkung von Animationen und Notizen beim Lernen von Optik“
 In: Höttecke, D. (Hg.): Naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen
 Vergleich, Jahrestagung der GDCP in Bern 2006
- 2006 Slančík, K., Starauschek, E. & Mikelskis, H.F.
 „Unterstützen Animationen und die Anfertigung von Notizen den
 Wissenserwerb in der Optik?“
 Tagungs-CD zur Frühjahrstagung der DPG, 2005
- 2005 Slančík, K., Starauschek, E. & Mikelskis, H.F.
 „Animationen zur optischen Abbildung und Lichtausbreitung
 mit einfachen Grafiken“
 Tagungs-CD zur Frühjahrstagung der DPG, 2005
- 2004 Slančík, K., Starauschek, E. & Mikelskis, H.F.
 „Bedingungen für die Gestaltung von Animationen beim Physiklernen“
 In: Pitton, A. (Hg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie,
 Vorträge der GDCP-Tagung in Heidelberg 2004
- 2002 Slančík, K.
 „Štúdium na Viedenskej Univerzite“ (Studieren an der Universität Wien)
 In Koubek, V. (Hg.): Didaktika Fyziky,
 Fakultät für Mathematik, Physik und Informatik
 Comenius Universität, Bratislava
- Slančík, K.
 „Tepelné javy v učive fyziky základnej školy“
 (Wärmelehre für die Sekundarstufe I. Eine Schulbuch-Alternative.
 Diplomarbeit)
 Fakultät für Mathematik, Physik und Informatik
 Comenius Universität, Bratislava