
Ästhetische Bilder und visuelle Faszination im Physikunterricht - kognitive und affektive Aspekte

Tatjana Zähringer

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Physik
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Vorgelegt von
Tatjana Lena Zähringer, geb. Lamparter

aus
Karlsruhe, Deutschland

München, den 20.01.2025

Dissertation eingereicht am: 20.01.2025

1. Gutachter: Prof. Dr. Raimund Girwidz

2. Gutachter: Prof. Dr. Andreas Müller

Mündliche Prüfung am: 28.03.25

Diese Arbeit ist lizenziert unter CC BY-SA 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Zusammenfassung

Bilder im Physikunterricht erfüllen über ihre instruktionalen Funktionen hinaus viele affektive Funktionen, wie z.B. Aufmerksamkeit erregen, Faszination wecken sowie Interesse fördern. Die bisherige Forschung legt nahe, dass eine erhöhte affektive Wahrnehmung die Freude und die Bereitschaft zur Auseinandersetzung mit physikalischen Inhalten verstärken kann. Studien schreiben dabei ästhetischen Bildern eine besonders hohe affektive Komponente zu. Für ein umfassendes Verständnis der Effekte von ästhetischen Bildern im naturwissenschaftlichen Unterricht sind weitere Erkenntnisse nötig.

Dies motiviert die in der vorliegenden Arbeit durchgeführte Untersuchung von Ästhetik und visueller Faszination instruktionaler Bilder im Physikunterricht. Mit dem Ziel, wichtige Komponenten für ästhetische Bilder zu erfassen, wurde ein Katalog mit forschungsbasierten Kriterien zur Auswahl von ästhetischen Bildern für den Physikunterricht zusammengestellt. Dabei wurden unter anderem Erkenntnisse der Psychologie angewendet sowie inhaltsbezogene Kriterien aus der Forschung und Praxis der Physikdidaktik mit einbezogen. In der vorliegenden Arbeit wurden diese Kriterien eingesetzt, um potentiell ästhetische Bilder zu dem Thema geometrische Optik mit dem Kontext Natur auszuwählen. Für eine instruktionale Einbindung wurden die Bilder als Teil von Aufgaben in eine Lernumgebung integriert. Zur Evaluation der subjektiv empfundenen visuellen Ästhetik wurde ein Messinstrument, basierend auch auf Vorarbeiten in der Kunst- und Emotionspsychologie, für Bilder im Physikunterricht zugeschnitten und validiert.

Auf dieser Basis wurde eine Schulstudie mit Schülerinnen und Schülern ($N = 118$) der Mittelstufe durchgeführt. Die Lernenden bearbeiteten in einem Crossover-Design Aufgaben mit ästhetischen Bildern und mit Bildern, die denselben Lerninhalt mit Bildern von Experimenten im Klassenzimmer zeigen. Anschließend wurden Bilder beider Kategorien nach ihrer ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung bewertet. Auch weitere Faktoren wie Interesse, themenspezifisches Wissen sowie die Bearbeitungszeit der Aufgaben wurden erhoben. Die Ergebnisse zeigen durchwegs eine signifikant bessere Bewertung der ausgewählten ästhetischen Bilder mit hohen Effektstärken für die ästhetische Bildwahrnehmung (Cohen's $d = [1,05 - 1,56]$) und die affektive Bildwahrnehmung (Cohen's $d = [0,85 - 1,48]$). Eine einzige punktuelle Ausnahme kann im Rahmen des Forschungshintergrunds gut erklärt werden. Für die Wissenszuwächse und Bearbeitungszeiten konnten bei den vorgegebenen begrenzten Interaktionszeiten keine signifikanten Unterschiede erfasst werden.

In dieser Arbeit wurden ästhetische Bilder im Kontext Natur sowohl dekorativ als auch instruktional durch Aufgaben in eine Lernumgebung integriert. Mit den in dieser Arbeit durchgeführten Studien konnte nachgewiesen werden, dass der hier entwickelte Kriterienkatalog nützlich für die Auswahl von ästhetischen Bildern ist, welche bei Lernenden eine signifikante positive ästhetische und affektive Wahrnehmung hervorrufen. Dieser Katalog kann auch Lehrkräften praktische Hinweise für die Auswahl ästhetischer Bilder liefern. Somit ist eine Grundlage für die weitere Nutzung des pädagogischen Potenzials von ästhetischen Bildern im Physikunterricht gelegt. Darüber hinaus bildet diese Arbeit eine Grundlage für zukünftige Untersuchungen von Ästhetik im naturwissenschaftlichen Unterricht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Empirische und theoretische Grundlagen.....	9
2.1	Visuelle Darstellungen in der Physikdidaktik	9
2.2	Aspekte der visuellen Ästhetik aus der Kunst	15
2.3	Aspekte für die instruktionale Einbindung von Bildern in eine Multimedia-Umgebung ...	20
2.4	Optik in der Sekundarstufe I	26
3	Forschungsfragen und Hypothesen	29
3.1	Forschungsfragen und Hypothesen zur Bildwahrnehmung	29
3.2	Forschungsfragen und Hypothesen bezüglich des Lernens	30
4	Material und Methoden	31
4.1	Auswahl der Bilder	31
4.2	Studie mit Bildern in einer Lernumgebung im Unterricht.....	41
4.3	Interviewstudie	53
5	Aufbereitung der Daten und deskriptive Statistiken	57
5.1	Itemanalyse der Skala zur wahrgenommenen visuellen Ästhetik.....	57
5.2	Aufbereitung der Daten des Wissenstests Optik	71
5.3	Aufbereitung der Daten zum Interesse	74
5.4	Affektive Variablen bezüglich des Arbeitens mit Bildern	75
5.5	Bewertung der Lernaufgaben	75
5.6	Aufbereitung der Daten zur Bearbeitungszeit	76
6	Ergebnisse zur ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung.....	79
6.1	Ergebnisse aus der Schulstudie	79
6.2	Erkenntnisse aus der Interviewstudie zur subjektiven visuellen Ästhetik	82
6.3	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse zur subjektiven visuellen Ästhetik	85
7	Ergebnisse zum Lernen mit ästhetischen Bildern.....	89
7.1	Erkenntnisse aus dem Wissenstest	89
7.2	Erkenntnisse aus der Lernumgebung.....	94
7.3	Einfluss der Prädiktorvariablen	97
7.4	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse zum Lernen mit ästhetischen Bildern	98
8	Diskussion und Ausblick	101
8.1	Theoriegeleiteter Kriterienkatalog für die Auswahl ästhetischer Bilder	101
8.2	Instrument zur Messung der subjektiven visuellen Ästhetik	102

8.3	Ästhetische und affektive Bildwahrnehmung	104
8.4	Lernen mit ästhetischen Bildern	105
8.5	Weiterführende Forschungsperspektiven	106
8.6	Ausblick zu computergenerierten ästhetischen Bildern	108
8.7	Schlussbemerkungen	109
Literaturverzeichnis		111
A. Anhang.....		123
A.1	Praktische Vorgehensweise bei der Auswahl der Bilder	123
A.2	Aufbereitung der Daten	125
A.3	Bewertungsschlüssel der Lernaufgaben.....	138
A.4	Interviewstudie	141
Publikationsliste.....		151
Danksagung		152

1 Einleitung

„Schön ist, was ohne Begriff als Gegenstand eines *nothwendigen* Wohlgefallens erkannt wird.“ (Kant, 1790)

Wer an Ästhetik denkt, verbindet damit zunächst eher nicht Physik, eine Wissenschaft, die Phänomene modelliert und quantifiziert. Ästhetik wird typischerweise mit etwas Subjektivem und Persönlichem verbunden, das unter anderem von individuellen Vorlieben geprägt ist. Allerdings lässt sich Ästhetik auch mit Mitteln der Wissenschaften beschreiben, die als Teil der Philosophie und Psychologie ästhetische Erfahrungen und die Bildung ästhetischer Urteile untersuchen (Kutschera, 1988). Bereits Kant widmete sich in zahlreichen Werken ausführlich der Ästhetik, siehe Eingangszitat (Kant, 1790; Strijbosch et al., 2022). So diskutierte er, dass ästhetische Urteile Prinzipien wie der Harmonie, einem prinzipiellen Gefallen und einem Anspruch auf subjektive Allgemeingültigkeit folgen. Tatsächlich gibt es quantifizierbare, objektive Eigenschaften, die einen Gegenstand ästhetisch wirken lassen. Solche Eigenschaften können unter anderem bestimmte Formen, Farben, Rhythmen und Bewegungen sein. Ästhetisch wahrgenommene Ausprägungen dieser Eigenschaften lassen sich oft auf Vorbilder in der Natur zurückführen, wie etwa auf den goldenen Schnitt (Kutschera, 1988). Ein bemerkenswertes Beispiel hierfür ist die spiralförmige Anordnung der Sonnenblumenkerne in der Blüte: die Struktur dieser Spirale folgt dem Verhältnis des goldenen Schnitts, der durch die Formel $\frac{a}{b} = \frac{a+b}{a} = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ beschrieben wird. Der goldene Schnitt findet sich nicht nur in vielen weiteren Objekten der Natur, auch in der Architektur findet er sich schon bei Bauten der alten Griechen.

Auch andere bekannte Denker und Künstler der Geschichte haben sich mit Ästhetik und ihrer Wahrnehmung beschäftigt. Bereits im 17. Jahrhundert verwendete Vermeer eine „Camera Obscura“, um in Gemälden Größenverhältnisse möglichst realitätsnah wiederzugeben. In einer aktuellen Studie wurde die ästhetische Wahrnehmung dieser Gemälde mit jenen verglichen, die Vermeer ohne optische Hilfsmittel gemalt hatte (Hantula et al., 2009). Zwei der in dieser Studie verwendeten Gemälde zeigt Abbildung 1.1. Beide Gemälde gelten als Meisterwerke, doch lassen sich bei dem Gemälde in Abbildung 1.1 a), welches mit Nutzung der Camera Obscura entstand, authentischere Proportionen mit mehr Tiefe, Substanz und Klarheit wahrnehmen. Die Probanden der Studie bewerteten das Gemälde „Sitzende Virginalspielerin“ ($M = 3,1$; $SD = 1,0$) tatsächlich als ästhetischer als das Gemälde „Die Gitarrenspielerin“ ($M = 2,5$; $SD = 1,0$). Auch insgesamt wurden Gemälde, die mit optischen Hilfsmitteln erstellt wurden, als signifikant ästhetischer wahrgenommen (Hantula et al., 2009).



Abbildung 1.1: Gemälde von Vermeer, welche er mit und ohne Hilfe einer Camera obscura malte. a) Das Gemälde „Zittende virginalspeelster“ (Sitzende Virginalspielerin) wurde mithilfe einer Camera obscura gemalt. „Zittende virginalspeelster“ von Vermeer (1670–1672b). b) Das Gemälde „De gitaarspeelster“ (Die Gitarrenspielerin) wurde ohne Hilfe einer Camera obscura gemalt. „De gitaarspeelster“ von Vermeer (1670–1672a).

Neben Größenverhältnissen sind auch die Anordnungen von Objekten für die ästhetische Bildwahrnehmung bedeutsam. So untersuchte Wertheimer die Wahrnehmung von Anordnungen einzelner Linien und Figuren, die er „Gestalten“ nannte (Wertheimer, 1923). Auf seinen Untersuchungen basieren die Gestaltgesetze, die auch in dieser Arbeit einbezogen werden. Darauf aufbauend erforschte Berlyne in seinen Studien Wirkungen von Objekteigenschaften auf ästhetische Urteile und inwiefern einzelne Linien, Formen und Figuren mehr oder weniger ästhetisch wahrgenommen werden (Berlyne, 1974). Neben Formen sind auch Farben ein zentraler Pfeiler der Ästhetik. Schon Goethe bemerkte in seiner Farbenlehre die ästhetische Wirkung von Farben und der Wechselwirkung zwischen Farbe und Wahrnehmung (Calvo Ivanovic, 2018; von Goethe, 1810). Seine Theorie hebt hervor, dass Farben nicht nur physikalische Phänomene, sondern auch emotionale und subjektive Empfindungen hervorrufen.

In Einrichtungen wie dem Max-Planck-Institut für Ästhetik oder dem City College of New York, wird quantitativ das ästhetische Empfinden und ästhetische Erfahrungen mithilfe von EKG-Messungen untersucht (Strijbosch et al., 2022). Dabei werden unter anderem Reaktionen auf Kunst und Musik erfasst, und gleichzeitig Aktivitätsmuster des Gehirns aufgezeichnet (Strijbosch et al., 2022). Es zeigt sich, dass beim Betrachten von als ästhetisch empfundenen Landschaften nicht nur visuelle Areale des Gehirns aktiviert werden, sondern auch Belohnungssysteme des Gehirns involviert sind (Isik & Vessel, 2021).

Licht als Thema in der Kunst, in der Fachphysik sowie im Schulunterricht

Dies zeigt, dass Kunst und Physik mehr Berührungspunkte haben, als es auf den ersten Blick scheint. Darüber hinaus bilden physikalische Methoden Grundlagen für wichtige Werkzeuge in der Kunst, insbesondere bei der Untersuchung und Konservierung von Kunstwerken. Spektroskopische Verfahren mit UV-, Röntgen- und Infrarotstrahlung werden verwendet, um Pigmente zu analysieren, nachträgliche Änderungen festzustellen und den Entstehungsprozess von Gemälden zu rekonstruieren (Kushel, 1985; Legrand et al., 2014; Magdy, 2022; Pelagotti et al., 2005).

Auch in der Fachphysik sind Licht, bzw. bildgebende Verfahren durch Strahlung ein zentrales Werkzeug, wie Abbildung 1.2 zeigt. Das Konzept von Licht und Strahlung ist in nahezu allen Disziplinen gegenwärtig: in Aufnahmen von mikroskopischen Objekten in der Biophysik, siehe Abbildung 1.2 a), bzw. in der Materialphysik, siehe Abbildung 1.2 b), als Signal ferner Galaxien in der Astrophysik, siehe Abbildung 1.2 c), als Teilchen in der Elementarteilchenphysik, als Informationsträger in der Quantenphysik oder als Strahlung in der Medizinphysik. Besonders in der Medizinphysik wird ein weit größerer Bereich des Spektrums genutzt als nur der sichtbare Bereich. Optik ist damit als Grundlage bildgebender Verfahren in der Fachphysik unverzichtbar.

„Licht“ ist ein Thema, das auch außerhalb der Fachphysik Interesse und Faszination weckt. Nicht zuletzt war das Jahr 2015, das „International Year of Light“, dem Thema „Licht“ gewidmet. Damals, aber auch heute noch, faszinierten komplexe Aufbauten in einem Laserlabor junge Besucher, selbst wenn die im Labor untersuchten Zusammenhänge von den jungen Besuchern zum Zeitpunkt des Besuchs noch kaum verstanden werden konnten. Ein weiteres Beispiel sind Planetarien, in denen der Sternenhimmel von Besuchern bestaunt und von Fachkräften erläutert wird. Zudem präsentiert die Webseite „APOD“ der NASA täglich ein astronomisches, faszinierendes Bild mit Erklärungen für Laien (Nemiroff & Bonnell), siehe Abbildung 1.2 c) für ein Beispiel.

In der Schule wird das komplexe Thema Licht schrittweise eingeführt, bzw. es wird „elementarisiert“. Elementarisieren bedeutet in der Didaktik, dass Inhalte vereinfacht und schülergerecht, aber so weit wie möglich ohne fachliche Verzerrungen dargestellt werden (Kircher & Girwidz, 2020). Auf diesen elementarisierten Modellen können in höheren Klassenstufen komplexere Modelle aufbauen, wenn durch erweiterte Kenntnisse ein tieferes Verständnis möglich wird (Kircher & Girwidz, 2020). So lassen sich zum Beispiel, aufbauend auf dem Verständnis des optischen Geräts Fotoapparat und dem Konzept Strahlung, das Erstellen von Infrarotbilder erklären. Weiterführend wird durch das Diskutieren von Infrarotbildern wie in Abbildung 1.2 d) die Thermoregulation in der Tierwelt sowie weiterführende Aspekte der Thermodynamik vorgestellt (Xing et al., 2023).

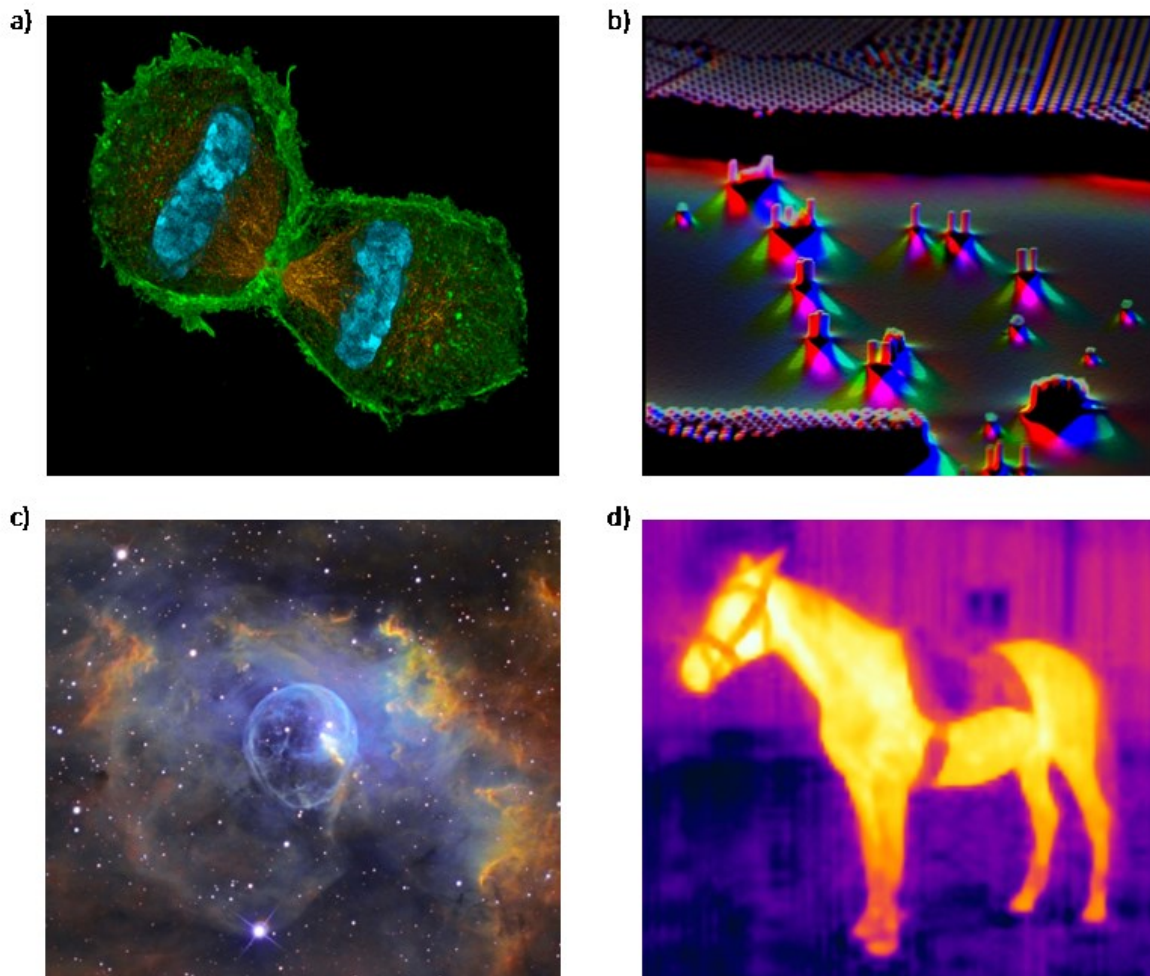


Abbildung 1.2: Faszination Licht in der Physik. a) Mikroskopiebild zweier Zellen während der Zellteilung, von Schermelleh, via Wikimedia Commons, lizenziert unter Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Lizenz. b) Mikroskopiebild von Nanodrähten für zukünftige Solarzellen, von Björn Hoffmann und Silke Christiansen, mit Genehmigung verwendet. c) Teleskopbild von NGC 7635, auch Blasennebel genannt, von copyright Russell Croman Astrophotography, mit Genehmigung verwendet. d) Pferd im Infrarotbild.

Ästhetik im Physikunterricht durch Bilder

Eine zentrale Motivation dieser Arbeit besteht darin, die Faszination für optische Phänomene in den Klassenraum zu bringen. Eine Möglichkeit dafür bietet der Einsatz von Bildern, insbesondere faszinierenden, ästhetischen Fotografien, mit denen sich Phänomene der Natur erklären lassen. Der Ansatz von erklärenden Bildern hat eine lange Tradition: bereits im 17. Jahrhundert in Comenius' Buch „The Orbis Pictus of John Amos Comenius“, (Die sichtbare Welt in Bildern), werden aussagekräftige Kupferstiche von Natur- und Alltagsszenen genutzt, um Kindern physikalische Phänomene und alltägliche Vorgänge zu erklären (Comenius, 1658, 1968). Comenius setzt dabei Bilder sowohl instruktional als auch dekorativ ein. Der Begriff "dekoratives Bild" in seiner heutigen Bedeutung wurde von Levin (1989) geprägt. „Dekorative Bilder“ sind danach ansprechend oder interessant, jedoch ohne klaren instruktionalen Zweck (Harp & Mayer, 1997). Instruktionale Bilder hingegen repräsentieren Lerninhalte und veranschaulichen wesentliche Informationen (Girwidz, 2020b; Lenzner et al., 2013; Lindner, 2020; Peterson et al., 2021). Insbesondere seit farbige Abbildungen in Schulbüchern

verbreitet sind, wird der Einsatz von dekorativen Bildern verstärkt in der Lernpsychologie diskutiert (Gilbert et al., 2008; Pettersson, 2013). Dekorative Bilder, insbesondere ästhetische Bilder, können Lernende emotional positiv beeinflussen und eine bessere Aufnahmefähigkeit fördern, indem sie höhere kognitive Kapazitäten ermöglichen (Lenzner et al., 2013; Miller, 2011). Zusätzlich wurden Emotionen und affektive Aspekte in ein zentrales Modell des Lernprozesses, der Cognitive Affective Theory of Learning with Multimedia, aufgenommen (Moreno, 2006).

Jedoch ist unklar, wie Emotionen und affektive Aspekte den Lernprozess im Detail beeinflussen. Dekorativen und affektiven Bildern wird als „seductive details“ einerseits Ablenkung nachgewiesen (Harp & Mayer, 1997; Rey, 2012; Schneider et al., 2016). Die Ergebnisse aktueller Studien zeigen andererseits uneinheitliche Effekte mit neutralen sowie positiven Einflüssen dekorativer Bilder auf den Lernfortschritt (Plass & Kalyuga, 2019; Schneider et al., 2018). Zunächst wurden dekorative Bilder jedoch lediglich als schmückende Elemente ohne inhaltliche Funktionen untersucht. Visuelle Darstellungen, einschließlich dekorativer Bilder, können jedoch mehrere Funktionen gleichzeitig erfüllen (Girwidz, 2020b). In nachfolgenden Studien wurden dekorative Bilder daher auch eingesetzt, um physikalische Inhalte in einen Kontext zu setzen (Scherer et al., 2023; Schneider et al., 2018; Schneider et al., 2016). Ergebnisse zeigten immerhin einen positiven Einfluss auf den Wissenserwerb, nicht jedoch auf Transferleistungen oder das Interesse (Scherer et al., 2023; Schneider et al., 2018; Schneider et al., 2016).

Ziel dieser Arbeit

Diese Arbeit geht über den kontextualisierenden Einsatz dekorativer Bilder hinaus und integriert ästhetische Bilder sowohl dekorativ als auch instruktional durch Aufgaben in eine Lernumgebung. Dazu werden ästhetisch ansprechende Bilder mit inhaltlich relevanten Informationen kombiniert. Ziel ist es, die geometrische Optik im Unterricht auf faszinierende Weise zu vermitteln, ohne die kognitive Belastung unnötig zu erhöhen. In der Lernpsychologie und Physikdidaktik gibt es zahlreiche Ansätze zur instruktionalen Einbindung von Bildern (Girwidz, 2020b; Peschke, 2017). Beispielsweise können Bilder Elemente enthalten, die von den Lernenden für das Lösen zugehöriger Aufgaben identifiziert werden müssen. Damit ein Bild tatsächlich als Blickfänger wirkt, Interesse weckt und positive Emotionen hervorruft, muss es sorgfältig ausgewählt werden. Ein Kriterienkatalog, anhand dessen Lehrkräfte ästhetisch wahrgenommene Bilder auswählen können, wäre hierbei wünschenswert. Solch ein Kriterienkatalog wird im Rahmen dieser Arbeit auf Basis von umfassender Literatur entwickelt. Was genau Ästhetik ist und wann ein Bild als ästhetisch wahrgenommen wird, ist Gegenstand zahlreicher Diskussionen in der Kunst und der Wahrnehmungspsychologie (Kutschera, 1988). Hier existieren bereits ausgereifte Modelle, die bestimmte Eigenschaften von Bildern wie Farbe und visuelle Komplexität spezifizieren (Leder & Nadal, 2014). Diese fördern eine subjektive visuelle Ästhetik und dienen als Grundlage für den Kriterienkatalog der vorliegenden Arbeit. Zur Messung der

klassischen und expressiven Ästhetik sowie der affektiven Wirkung von Bildern und Fotografien wurden bereits psychometrische Instrumente entwickelt und validiert (Lavie & Tractinsky, 2004; Lenzner et al., 2013; Miller, 2011; Steyer et al., 1997). Die Entwicklung und Validierung eines Instruments zur Messung der ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung im Physikunterricht stellt ein weiteres Ziel dieser Arbeit dar.

Aufbau der Arbeit

Die folgende Grafik Abbildung 1.3 visualisiert die Struktur der vorliegenden Arbeit. In Kapitel 2 werden die Grundlagen für die Kriterien der Bildauswahl gelegt. Diese basieren sowohl auf ästhetischen als auch auf fachdidaktischen Aspekten. Zudem wird in Kapitel 2 der aktuelle Stand der Forschung zum Lernen mit Bildern dargestellt. Daraus werden in Kapitel 3 die Forschungsfragen abgeleitet. Basierend auf der in Kapitel 2 zusammengestellten Literatur werden in Kapitel 4.1 ein Kriterienkatalog für die Bildauswahl zusammengestellt sowie die danach ausgewählten dekorativen Bilder präsentiert. Diese Bilder werden in Kapitel 4.2 instruktional durch Aufgaben in eine interaktive Lernumgebung für den Physikunterricht integriert. Dieses Kapitel beschreibt auch die zugehörige Studie mit 118 Schülerinnen und Schülern, mit der die ästhetische und affektive Wahrnehmung der Bilder sowie die Auseinandersetzung mit der Lernumgebung untersucht werden. Dazu werden auch die in dieser Schulstudie verwendeten Messinstrumente und Materialien erläutert. Für ein vertieftes Verständnis der Bildwahrnehmung wird die Schulstudie durch eine Interviewstudie mit weiteren 18 Schülerinnen und Schülern ergänzt. Deren Aufbau und Durchführung wird in Kapitel 4.3 beschrieben.

Die Datenaufbereitung sowie die Validierung des Messinstruments zu ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung werden in Kapitel 5 vorgestellt. In den folgenden Kapiteln werden die Daten zur ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung (Kapitel 6) sowie die Daten bezüglich des Lernens mit ästhetischen Bildern (Kapitel 7) mit statistischen Analysemethoden untersucht und die Ergebnisse präsentiert. Die Ergebnisse der Analysen werden jeweils am Ende der Kapitel in Hinblick auf die Forschungsfragen interpretiert. Abschließend werden in Kapitel 8 alle Ergebnisse diskutiert, gefolgt von einem Ausblick auf zukünftige Forschungsmöglichkeiten. Ergänzende Diagramme und Tabellen der Auswertung sind im Anhang (Kapitel A) zu finden.

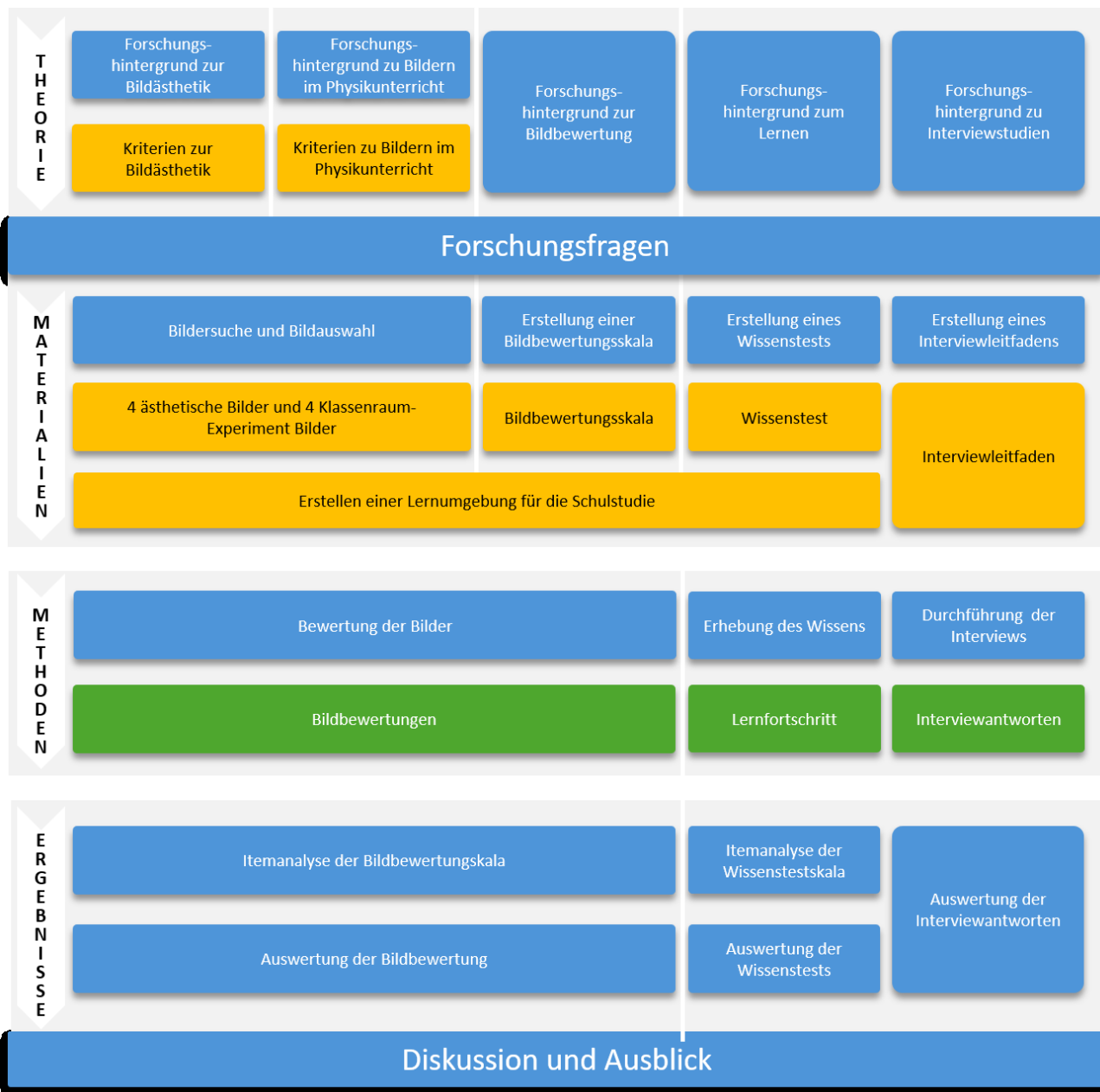


Abbildung 1.3: Struktur der vorliegenden Arbeit. In Blau sind Kapitel, welche Grundlagen oder Abläufe beschreiben. In Gelb sind entstandene Materialien, welche in weiterführenden Studien verwendet werden können. In Grün sind die gewonnen Daten aus der Schul- und Interviewstudie.

2 Empirische und theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen vorgestellt, nach denen bei der Planung und Durchführung der Studien Bild- und Lernmaterial ausgewählt und eingesetzt werden. Der Einsatz von Bildern verlangt zunächst einen theoretischen Rahmen, wie Bilder im Lernprozess hilfreich eingesetzt werden können (Kapitel 2.1). Dabei wird aufgezeigt, welche spezifischen Funktionen Bilder im Lernprozess erfüllen können. Diese Überlegungen führen zu dem in der vorliegenden Arbeit verfolgten Ziel, Bilder einzusetzen, die zugleich dekorativ und instruktional sind. In Kapitel 2.2 werden daher Kriterien für die Auswahl ansprechender und ästhetischer Bilder erörtert. Anschließend werden in Kapitel 2.3 konkrete Aspekte aus der Medien- und Physikdidaktik vorgestellt, um den instruktionalen Einsatz solcher Bilder im Unterricht zu unterstützen. Damit das Lernmaterial sowie die Bilder inhaltlich in das Physikcurriculum integriert werden können, wird ein einheitliches Thema für alle Bilder festgelegt. Geometrische Optik hat sich hierbei hinsichtlich ästhetischer, didaktischer und inhaltlicher Aspekte als besonders geeignet erwiesen. In Kapitel 2.3.6 wird daher der Lehrinhalt „Geometrische Optik in der Sekundarstufe I“ vorgestellt und auf Anknüpfungspunkte im Lehrplan hingewiesen.

2.1 Visuelle Darstellungen in der Physikdidaktik

Zentrale Modelle und Theorien beschreiben grundlegende Aspekte des Lernens mit Bildern bzw. visuellen Darstellungen. Im Folgenden werden die „Cognitive Theory of Theory of Multimedia Learning“, die Erweiterung zur „Cognitive-Affective Theory of Learning with Multimedia“ sowie das "Design, Function, Task" (DeFT) Rahmenmodell für den Einsatz multipler visueller Darstellungen und Text vorgestellt (Ainsworth, 2006; Mayer, 2024; Moreno, 2006; Moreno & Mayer, 1999, 2007). Anschließend wird auf die unterschiedlichen Funktionen von Bildern im Physikunterricht eingegangen, wobei Aspekte wie Abstraktionsgrade von visuellen Darstellungen sowie die Wirksamkeit dekorativer und instruktionaler Bilder thematisiert werden (Carney & Levin, 2002; Girwidz, 2020b; Lenzner et al., 2013). Hier wird auch deutlich, an welchen Stellen die aktuelle Studienlage bezüglich dekorativer Bilder noch Lücken aufweist und weiteres Forschungspotenzial besteht.

2.1.1 Visuelle Darstellungen in der Didaktik

Zum Lernen mit visuellen Darstellungen gibt es bereits eine Vielzahl an Untersuchungen (Girwidz, 2009, 2020b). Insbesondere mit dem Aufkommen neuer und digitaler Medien haben visuelle Darstellungen an Bedeutung gewonnen. „Medien“ sind hier Wissensvermittler, die Inhalte in verschiedenen Formen übertragen, darstellen und/oder abspielen können (Girwidz, 2020b). Traditionell gehören dazu klassische Schulbücher, die visuelle Darstellungsformen wie Texte, Tabellen, Diagramme bis hin zu Schemazeichnungen und Fotografien enthalten (Girwidz, 2020b). Der Begriff „Medium“ kann sich ebenso auf verschiedene technische Geräte wie Wandtafel, Overheadprojektor,

Beamer oder Tablet beziehen. Zu „Medien“ können auch interaktive Lernprogramme hinzugezählt werden, die oft sogar reicher an visuellen Elementen sind als zum Beispiel Schulbücher. Solange jedoch Medien nur die gleiche visuelle Darstellung ohne zusätzliche Aktivitäten zeigen, gibt es lernpsychologisch beim Lernvorgang keine großen Unterschiede (Moreno, 2006; Wiesner et al., 2011). Dabei können visuelle Darstellungen neben der Zeigefunktion verschiedenste Funktionen im Physikunterricht erfüllen, siehe Kapitel 2.1.2. Medien, und damit insbesondere Bilder, sind daher ein zentraler Pfeiler der Wissensvermittlung. Sie können in vielfältiger Weise den Lernprozess unterstützen. Eine der grundlegenden Theorien zum Beschreiben des Lernprozesses mit Medien ist die „Cognitive Theory of Multimedia Learning“ (CTML), (Mayer, 2024; Moreno & Mayer, 1999). Nach der CTML werden zunächst Texte und Bilder wahrgenommen und Informationen daraus selektiert. Das Modell beschreibt weiter, wie diese Informationen im Arbeitsgedächtnis zu einer Repräsentation des im Text oder Bild gezeigten Inhalts weiterverarbeitet werden. Weiterhin beschreibt das Modell, dass diese weiterverarbeiteten Informationen danach mit bereits gelernten Informationen aus dem Langzeitgedächtnis verknüpft und schließlich gespeichert werden. In der ursprünglichen Form der CTML werden affektive Faktoren wie Emotion und Motivation nicht berücksichtigt (Leutner, 2014; Mayer, 2024). Studien zeigen jedoch, dass Emotionen und Motivation entscheidende Faktoren im Lernprozess sind (Carney & Levin, 2002; Lenzner et al., 2013; Leutner, 2014; Moreno & Mayer, 2007). Daher wurde die CTML um emotionale und motivationale Faktoren zu der „Cognitive-Affective Theory of Learning with Media“ (CATLM) erweitert, siehe auch Abbildung 2.1 (Moreno, 2006; Moreno & Mayer, 2007). Mit der Erweiterung wird berücksichtigt, dass Motivationsfaktoren das kognitive Engagement und die Anstrengung der Lernenden bei der Verarbeitung von Informationen im Arbeitsgedächtnis beeinflussen. So berichten Moreno et al. (2001), dass Lernende, die interessierter am Lernmaterial sind, sich intensiver mit dem Material auseinandersetzen: Sie würden stärker versuchen, mithilfe der Materialien ein kohärentes mentales Modell zu formen. Welche Emotionen im Speziellen (generelle Emotionen oder Lernemotionen) auf welche Art und Weise sich auf den Lernprozess auswirken, wird allerdings nicht genau spezifiziert (Stark, Malkmus et al., 2018). Prinzipiell affektiv-motivationalen Effekte zu erreichen, ist ein zentrales Ziel dekorativer Bilder (Chiu et al., 2020; Lenzner et al., 2013; Lindner, 2020). Eine eingehende Betrachtung dekorativer Bilder erfolgt im nächsten Unterkapitel 2.1.2.

Für den zielgerichteten Einsatz von visuellen Darstellungen und Text und damit auch von Bildern, gibt das DeFT („Design, Functions, Tasks“) Rahmenmodell potentielle Designkriterien vor (Ainsworth, 2006; Mayer, 2005). Das Modell beschreibt Einflüsse beim Lernen mit mehreren visuellen Darstellungen und Texten (Ainsworth, 2006). Ein relevanter Aspekt des Rahmenmodells für die vorliegende Arbeit ist das räumliche Kontiguitätsprinzip für Bilder und Text bzw. Aufgaben. Aus diesen Überlegungen leitet sich unter anderem das Designkriterium ab, dass Bilder und damit verknüpfte

Textinhalte nicht weit voneinander entfernt sein sollten, damit beides im Blickfeld des Lerners ist (Girwidz, 2020b; Niegemann et al., 2008).

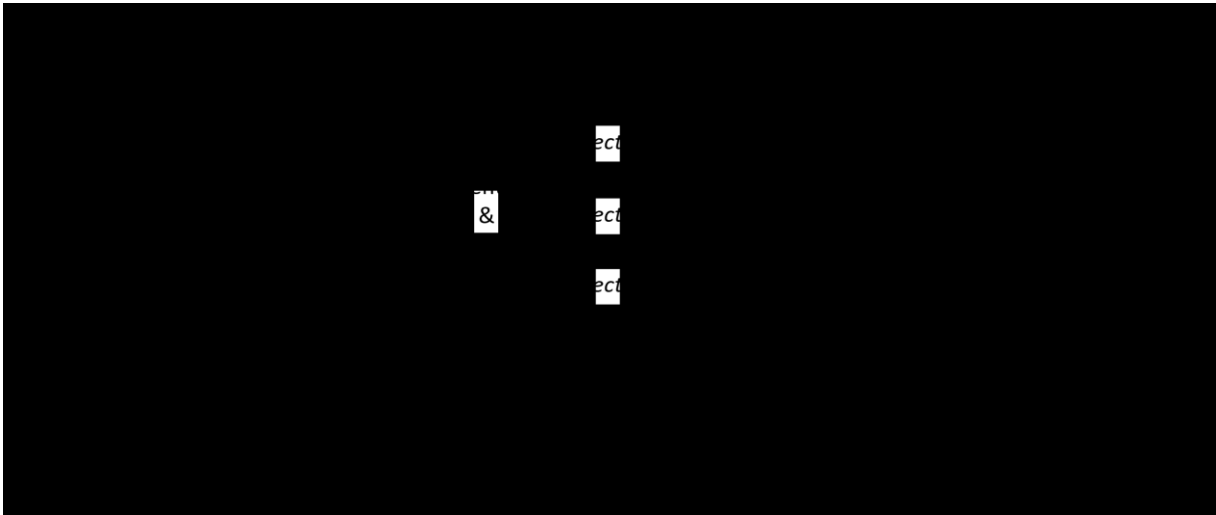


Abbildung 2.1: Die Abbildung zeigt schematisch die „Cognitive-Affective Theory of Learning with Media“ (CATLM). Zunächst werden mediale Inhalte wahrgenommen und Informationen daraus selektiert. Im Arbeitsgedächtnis werden diese Informationen zu einer Repräsentation des im Text oder Bild gezeigten Inhalts organisiert. Schließlich werden diese neuen Informationen mit bereits gelernten Informationen aus dem Langzeitgedächtnis integriert. Zusätzlich beeinflussen motivationale Faktoren, selbstregulierende Fähigkeiten und individuelle Lernermerkmale die Informationsverarbeitung. Nach (Moreno & Mayer, 2007).

2.1.2 Funktionen von visuellen Darstellungen im Physikunterricht

In heutigen Klassenzimmern, insbesondere im Physikunterricht, findet eine kontinuierliche Integration verschiedener Medienformen statt (Girwidz, 2020b). Innerhalb von Schulbüchern behält die Einbeziehung von Bildern, Diagrammen und Strukturelementen ihre Bedeutung, was die Unabdingbarkeit eines grundlegenden Verständnisses der Bildkompetenz im Bildungsbereich unterstreicht (Koenen et al., 2020; Pettersson, 2013). Aus der aktuellen Forschung neu dazu kommen Medien wie HoloLenses, welche Augmented Reality (AR)- und Virtual Reality (VR)- Anwendungen ermöglichen. Auch bei diesen Medien bleiben visuelle Darstellungen wie Bilder und Texte grundlegende und wesentliche Elemente (Girwidz, 2020b). Diese vielfältigen Einsatzmöglichkeiten zeigen, dass visuelle Darstellungen im Physikunterricht in vielen verschiedenen Erscheinungsformen auftreten. Dabei erfüllen visuelle Darstellungen vielseitige Funktionen. Der folgende Absatz bietet einen Überblick über verschiedene Darstellungstypen und deren Funktionen, wie sie in einem Buchkapitel von Girwidz (2020b) skizziert werden.

Visuelle Darstellungen lassen sich anhand ihrer Abstraktionsgrade kategorisieren. Diese Abstraktionsgrade stellen unterschiedliche Anforderungen an die Lernenden und erfüllen

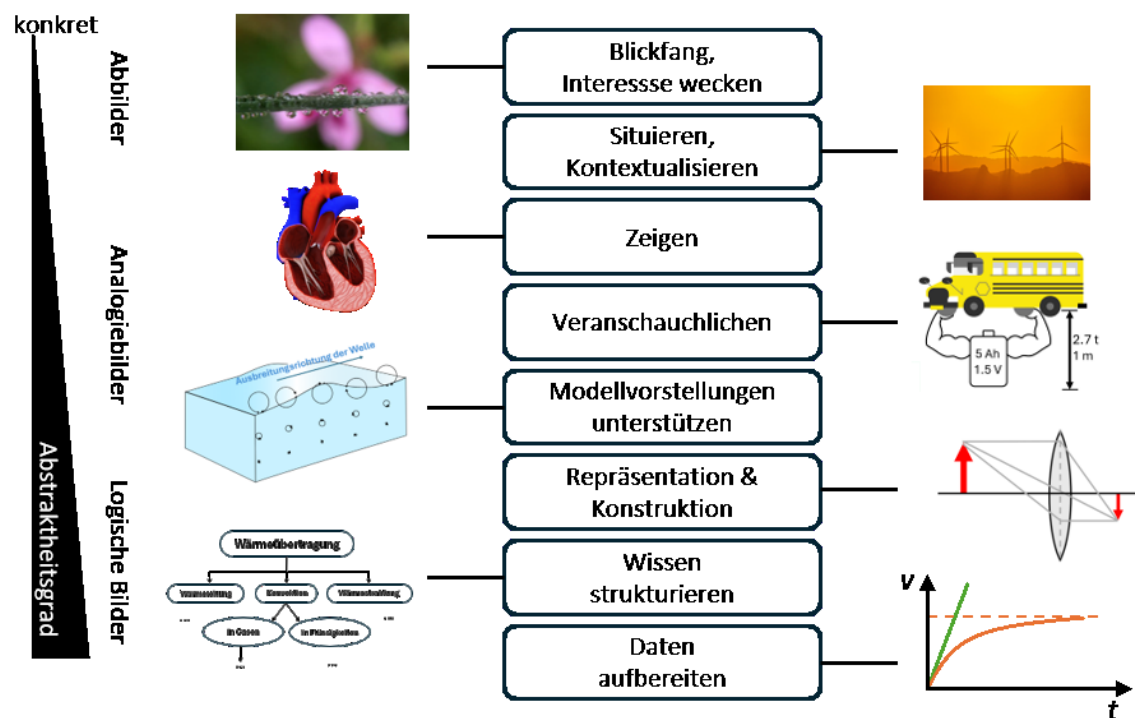


Abbildung 2.2: Funktionen von Bildern in der Physik aus didaktischer und methodischer Sicht. Idee nach Girwidz, (2009), Bild oben links: Mila Zinkova, mit Genehmigung verwendet. Bild oben rechts: Wayne S. Grazio, Flickr, Lizenz: CC BY-NC-ND 2.0.

unterschiedliche Funktionen, siehe Abbildung 2.2. Fotografien dienen als am wenigsten abstrakte visuelle Darstellungen oft als initiale Blickfänger und wecken damit Aufmerksamkeit oder/und kontextualisieren Inhalte. Außerdem können Fotografien als motivierende Elemente oder als einleitende Stimuli fungieren. Skizzenhafte Illustrationen und realistische Zeichnungen, begleitet von Bildunterschriften, dienen primär dem Zeigen und Erklären. Dabei können Objekte oder Prozesse dargestellt werden, welche aufgrund ihrer Größe, Gefährlichkeit oder Unsichtbarkeit normalerweise außerhalb der menschlichen Wahrnehmung liegen. In Diagrammen und logischen Darstellungen hingegen repräsentieren Konturen oder Formen keine visuellen Eigenschaften von Gegenständen oder Phänomenen mehr. Stattdessen zeigen Linien und Flächen Daten und bereiten Zusammenhänge auf. Abstrakte „Advanced Organizer“ und Concept Maps funktionieren primär der Organisation von Inhalten. Angesichts der Vielzahl möglicher Funktionen einer visuellen Darstellungen ist es wichtig hervorzuheben, dass der Einsatz von visuellen Darstellungen mehrere Funktion gleichzeitig erfüllen kann (Girwidz, 2020b).

Gerade dadurch, dass visuelle Darstellungen weitverbreitet sind und viele Funktionen erfüllen können, muss auf verschiedene Kriterien geachtet werden, damit die visuellen Darstellungen ihre Funktionen tatsächlich erfüllen. So ist zum Beispiel bei der Verwendung von Bildern unbedingt auf deren Einbindung in das Lernmaterial zu achten. Bilder wie Fotografien und Zeichnungen, die zwar visuell und ästhetisch ansprechend sind, jedoch nur wenig oder gar keinen Bezug zum Lerninhalt haben

und keine relevanten Informationen liefern, werden als dekorative Bilder bezeichnet (Lindner, 2020). Dekorative Bilder werden eingesetzt, um die Stimmung zu verbessern, die Aufmerksamkeit zu steigern oder das Interesse und die Freude an bestimmten Lerninhalten zu wecken (Lenzner et al., 2013; Lindner, 2020). Im Gegensatz dazu gibt es instruktionale Bilder, die beispielsweise als Schemazeichnung relevante Informationen enthalten. Instruktionale Bilder können die Lernfähigkeit erhöhen, indem sie die Konstruktion mentaler Modelle konkret unterstützen (Lenzner et al., 2013).

Der Begriff „dekorative Bilder“ in seiner modernen Bedeutung wurde von Levin geprägt und bezeichnet ansprechende oder interessante Bilder „ohne einen klaren didaktischen Zweck“ (Harp & Mayer, 1997; Levin, 1989). Lange Zeit herrschte die weit verbreitete Meinung, dass dekorative Bilder vom Lerninhalt ablenken und daher kontraproduktiv sind. Nur instruktionale Bilder wurden als lern- und lehrrelevant angesehen. Bereits in der Arbeit von Levin (1989) wurde auf Grundlage früherer Forschungsarbeiten der Schluss gezogen, dass dekorative Bilder das Lernen aus einem Text nicht erleichtern, da sie nicht dem „Prinzip folgen, dass Bilder im Text in irgendeiner Weise mit dem Text in Verbindung stehen müssen“ (Levin, 1989). Dies steht im Einklang mit Erkenntnissen, wonach eine affektive Anregung die für die kognitive Verarbeitung verfügbare Kapazität des Arbeitsgedächtnisses verringern und sich somit negativ auf das Lernen auswirken kann (Easterbrook, 1959; Ellis & Ashbrook, 1988; Knörzer et al., 2016).

Eine weitere einflussreiche Studie, die diese Auffassung stützt, wurde von Harp und Mayer (1997) durchgeführt. Hierbei werden dekorative Bilder als „verführerische Details“ verstanden. Aus den Ergebnissen der Studie wird geschlossen, dass dekorative Details sowohl bei Bildern als auch bei Texten das Erlernen von wissenschaftlichen Inhalten beeinträchtigen (Harp & Mayer, 1997). Für die Einordnung der Studie von Harp und Mayer (1997) ist zu beachten, dass die ausgewählten dekorativen Bilder für den spezifischen Zweck des Lerntextes (z. B. das Entstehen von Blitzen) irrelevant waren, nicht aber für das Thema im Allgemeinen (d. h. Blitze und ihre Auswirkungen). Aus der Sicht der Lehrperson waren die Bilder (z. B. ein Blitzschlag in einem Flugzeug) tatsächlich interessant und geeignet, einen motivierenden Kontext für den gegebenen Lerninhalt zu schaffen.

Die Sichtweise von dekorativen Bildern als „verführerische Details“, die das Lernen „durch eine Zunahme von lernirrelevanten kognitiven Prozessen“ (Schneider et al., 2016) beeinträchtigen, wurde später in die von Mayer und Kollegen (Mayer, 2005) entwickelte CTML integriert. Sie kommen zu dem Schluss, dass das Lernen erheblich verbessert wird, wenn dekoratives Material weggelassen wird (Median der Effektstärke $d = 1,32$). Diese Befunde über einen nachteiligen „verführerischen Detaileffekt“ für das Lernen wurden in einer Metaanalyse von Rey mit großen Effektgrößen bei dem Verzicht auf dekorative Bilder bei der Reproduktion von Wissen ($d = 0,95$) und beim Wissenstransfer ($d = 0,83$) bestätigt (Rey, 2012).

Jedoch wurde in den letzten zehn Jahren die Denkweise „dekorativ = verführerisch = schädlich“ zunehmend in Frage gestellt, sowohl aufgrund empirischer Befunde als auch aufgrund fortgeschrittener Theorien. Lenzner et al. (2013) haben gezeigt, dass dekorative Bilder in einem Unterricht der Sekundarstufe I zum Thema geometrische Optik die Stimmung, die Aufmerksamkeit und die Ruhe fördern können und nur wenig oder gar keine ablenkenden Effekte haben. Außerdem wurde festgestellt, dass dekorative Bilder den wahrgenommenen Schwierigkeitsgrad des Lerninhalts verringern können. Plass et al. (2014) diskutieren, inwiefern ästhetisch ansprechende Bilder das Verstehen erleichtern können. Plass und Kaplan (2016) stellen darüber hinaus fest, dass Designs mit unterschiedlichen Graden der Ästhetik verschiedene Emotionen auslösen und diese Emotionen die Wahrnehmung der Lernenden und ihre kognitive Verarbeitung beeinflussen können. Weiterhin wurde festgestellt, dass multimediale Elemente wie die visuelle Gestaltung „zu einer positiven Wahrnehmung des Lernens durch den Nutzer führen“ (Plass & Kaplan, 2016). Diese Ergebnisse decken sich mit früheren Forschungsarbeiten, die darauf hindeuten, dass ein positiver Zustand im Allgemeinen einen positiven Einfluss auf das Lernen haben kann (Abele-Brehm, 1992; Schwarz, 1990). Umgekehrt stellte Lindner (2020) für mathematische und in naturwissenschaftliche Kontexte der Sekundarstufe I fest, dass dekorative Bilder in Testaufgaben keine wesentlichen nachteiligen Auswirkungen auf die Leistung hatten. Nach derzeitiger Auffassung ist die empirische Evidenz in diesem Bereich nicht schlüssig (Schneider et al., 2018), wobei Studien eine ablenkende Wirkung von dekorativen Bildern (Mayer, 2005; Schneider, 2017) oder umgekehrt keine ablenkende Wirkung zeigen (Schneider, 2017).

Eine Übersicht von Plass und Kalyuga (2019) betont aus einer theoretischen Perspektive die Rolle der Emotionen in der Theorie der kognitiven Belastung die affektive Verarbeitung, insbesondere die emotionalen Erfahrungen der Schüler während des Lernens und anderer kognitiver Prozesse. Als affektive Faktoren werden während des Lernprozesses erlebten Gefühle oder Emotionen genannt (Plass & Kalyuga, 2019). Ein Ergebnis ist, dass ein umfassendes Verständnis der kognitiven Verarbeitung die Berücksichtigung affektiver Faktoren erfordert. Es wird insbesondere diskutiert, wie affektive Faktoren in Modelle des multimedialen Lernens wie das CATLM einbezogen werden können.

Nach der CATLM beeinflussen solche Prozesse das Lernen, welche die langfristige Einstellung und das kurzfristige Verhalten einer Person gegenüber dem Lernen steuern und aufrechterhalten. Hierbei wird Einfluss auf das kognitive Engagement der Lernenden ausgeübt. Dabei betont das CATLM die Bedeutung affektiver Faktoren als kritische Komponente für die Zuweisung von Arbeitsgedächtnisressourcen zu Lerninhalten und Lernaufgaben. Infolgedessen sind Funktionen wie das Erregen von Aufmerksamkeit, das Aufrechterhalten der Aufmerksamkeit und das Herstellen von Kontextualisierungen von entscheidender Bedeutung. Somit betrachtet das CATLM das Lernen „als ein Ergebnis der Interaktion zwischen Einstellungen, Emotionen und Wissen“ (Plass & Kalyuga, 2019). Diese Interaktion bestimmt die „Regulierung kognitiver Prozesse“ und hat somit einen starken Einfluss

auf die Prinzipien der Unterrichtsgestaltung, die sowohl affektiv als auch kognitiv stimulierend und effektiv ist.

Ein jüngerer Forschungsstrang, der neue Perspektiven und interessante Ergebnisse bezüglich des Lernprozesses liefert, befasst sich mit „verwandten“ dekorativen Bildern. Dies sind visuell ansprechende Bilder, die keine erklärende Funktion haben, sondern gezielt mit dem zu vermittelnden Text und Inhalt in Verbindung gebracht werden und dazu dienen, einen visuellen Kontext für schaffen (Scherer et al., 2023; Schneider et al., 2018; Schneider et al., 2016). Im Gegensatz dazu wurden in vorherigen Studien dekorative Bilder dem Text und den Lerninhalten nebeneinandergestellt, ohne eine Verbindung herzustellen (Harp & Mayer, 1997).

In neueren Studien (Scherer et al., 2023) zu verwandten dekorativen Bildern mit einer Hilfsfunktion wurde nicht versucht, die Aufmerksamkeit stärker auf das Bild als auf den Hauptinhalt des Textes zu lenken. Stattdessen verbesserten die dekorativen Bilder das Lernen durch kognitive Aktivierungsprozesse, die durch den visuell ansprechenden Kontext ausgelöst wurden (Scherer et al., 2023).

Auch Pettersson (2013) betont, dass Bilder aktiv genutzt werden müssen, indem sie sich auf Text oder Aufgaben beziehen und nicht nur als rein dekorative Elemente dienen. In der vorliegenden Arbeit werden daher Fotografien implementiert, die gleichzeitig dekorativ und instruktional sind. Um sicherzustellen, dass die Bilder dekorativ sind und als ansprechend wahrgenommen werden, werden Kriterien zur wahrgenommenen visuellen Ästhetik aus Kunst und Design evaluiert und umgesetzt, siehe Kapitel 2.2 sowie 4.1. Ihre instruktionale Einbindung erfolgt durch die Integration in Aufgaben in einer interaktiven Lernumgebung mit Feedbackmechanismen, siehe Kapitel 2.3.

2.2 Aspekte der visuellen Ästhetik aus der Kunst

Visuelle Ästhetik und affektives Design finden im Bereich der Didaktik mehr und mehr Beachtung, wie auch die Anzahl aktueller Studien aufzeigt (Lenzner, 2009; Nascimento et al., 2021; Niegemann et al., 2008; Plass & Kaplan, 2016; Smith et al., 2011). Ein unkomplizierter und praktikabler Einsatz von ästhetischen Bildern im Schulunterricht ist jedoch erst möglich, wenn es einen einfachen und geordneten Zugriff auf eine Vielzahl von ästhetischen Bildern gibt. Es existieren bereits Datenbanken mit einer Fülle an Bildern mit verschiedensten Inhalten, welche nach Kriterien der Ästhetik (siehe folgende Unterkapitel) bewertet wurden. Jedoch enthalten diese Datenbanken oft wenige Bilder, die speziell für physikalische Phänomene relevant sind (Scharinger, 2023). Daher sind Kriterien wünschenswert, mit deren Hilfe zum Beispiel eine Lehrperson selbst entscheiden kann, ob ein Bild potenziell ästhetisch wahrgenommen wird.

In der Kunst ist das Konzept von Ästhetik etabliert und vielfach diskutiert (Birkhoff, 1933; Kutschera, 1988). Ein Ausgangspunkt um Ästhetik von Bildern objektiv zu beschreiben, ist das Modell von Leder, siehe auch Abbildung 2.3 (Leder et al., 2004). Dieses Modell wird nicht nur in Studien zu Bildern im Bereich Kunst verwendet, sondern auch in Bereichen wie der Ästhetik von technischen Konstruktionen (Górniak, 2009) oder der Ästhetik von Webseiten (Miller, 2011). Das Modell der ästhetischen Erfahrung von Leder bildet eine fundierte Grundlage für die Bildung ästhetischer Urteile und Emotionen zu Bildern.

Das genannte Modell basiert auf einer Vielzahl an Ergebnissen und Überlegungen aus Analysen von Kunstwerken aus kognitions-psychologischer Sicht sowie aus Studien der ästhetischen Kunst von Leder und Kollegen (Berlyne, 1974; Leder, 1996, 2001; Locher & Nodine, 1987; Ramachandran & Hirstein, 1999; Solso, 1994; Zeki, 1999). Im Folgenden werden die für die vorliegende Arbeit relevanten und zutreffenden Aspekte aus dem Modell von Leder et al. (2004) vorgestellt.

2.2.1 Das Modell der ästhetischen Erfahrung von Leder

Leder et al. (2004) schlüsseln in ihrem Modell die Stadien der visuellen Verarbeitung bei der Betrachtung eines visuellen Kunstobjekts auf, siehe Abbildung 2.3. Ab dem ersten Blick beginnen die *Perzeptuelle Analysen*, die bereits die affektive Beurteilung beeinflussen (Reber et al., 1998). Nach Leder et al. (2004) folgen darauf die *Implizite Gedächtnisintegration*, die *Explizite Klassifikation*, die *Kognitive Bewältigung* und die *Evaluation*, siehe auch Abbildung 2.3. Beeinflusst werden diese Vorgänge von der Vorerfahrung des Betrachters sowie von der Vertrautheit mit dem Kontext und Inhalt des jeweiligen Kunstobjekts (Leder et al., 2004). In der initialen Phase der perzeptuellen Analysen sind konkrete Bildmerkmale ausschlaggebend: Visuelle Komplexität, Symmetrie, Kontrastverteilung und Gruppierung, Klarheit und Farbigkeit (Leder et al., 2004). Diese Bildmerkmale sind für die vorliegende Arbeit von besonderer Relevanz, da sie zum einen objektiv beurteilt bzw. beeinflusst werden können. Zum anderen finden die Verarbeitungsvorgänge der perzeptuellen Analysen ebenfalls bei der Wahrnehmung nicht-ästhetischer, visueller Objekte statt (Leder et al., 2004; Reber et al., 1998). Ebenso ist der Aspekt der Vorerfahrung relevant. Dieser kann in der Physikdidaktik dem konzeptuellen Vorwissen verglichen werden. Im folgenden Abschnitt werden diese beeinflussenden Aspekte individuell betrachtet und die Bedeutung für Bilder im Physikunterricht herausgestellt.

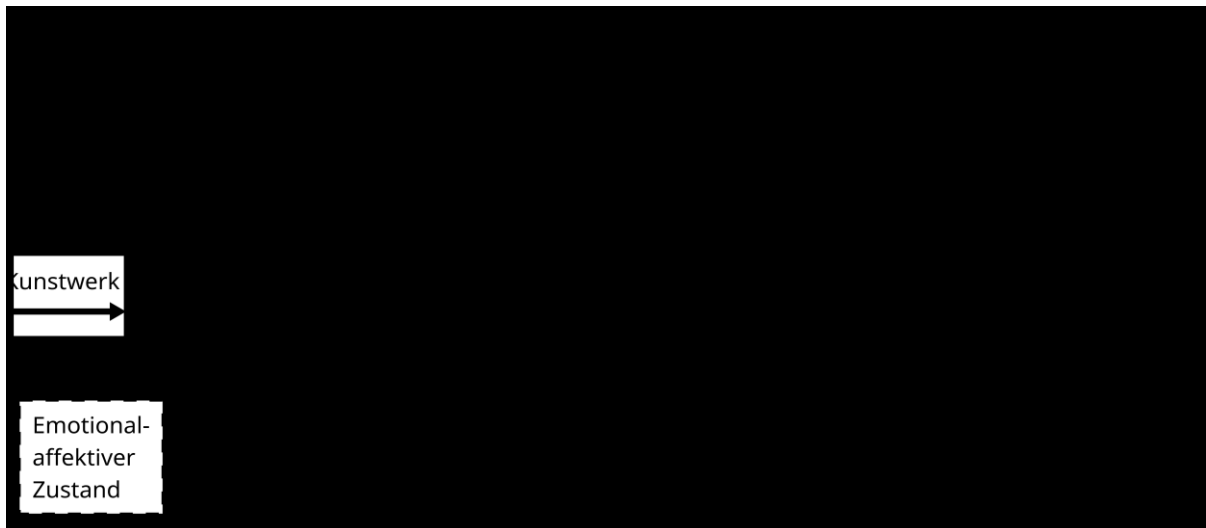


Abbildung 2.3: Schematisches Modell ästhetischer Erfahrung (Leder et al., 2004), adaptiert von (Hekkert, 2006). Visualisiert sind hier die einzelnen Prozesse der ästhetischen Urteilsbildung beim Betrachten eines visuellen Kunstobjekts. In den „perzeptuellen Analysen“ kommen unter anderem Bildmerkmale wie „visuelle Komplexität“ und „Ordnung und Gruppierung“ zum Tragen.

2.2.2 Farbe und Farbkontrast

Farben zählen zu einem integralen Bestandteil von Bildern. Allgemein wird nahegelegt, dass eine größere Farbigkeit Bilder als ästhetischer wahrnehmen lässt (Kutschera, 1988; Leder et al., 2022; Nascimento et al., 2021). Daher sind Farben in künstlerischen Fotografien (Deng et al., 2017; Halonen, 2014; Hasler & Suesstrunk, 2003; Leder et al., 2022) sowie im Design von Lernumgebungen und Webseiten (Moshagen & Thielsch, 2010; Nascimento et al., 2021) ein Ziel zahlreicher Untersuchungen. Farbe und Farbharmonien spielen insbesondere eine zentrale Bedeutung bei der ästhetischen Beurteilung (Iigaya et al., 2021; Kong et al., 2016; Leder et al., 2004; Li & Chen, 2009). Auch in der Didaktik wird der Aspekt „Farbe“ aufgenommen (Plass et al., 2014; Smith et al., 2011; Stark, Malkmus et al., 2018). Im Folgenden wird nur auf die für die vorliegende Arbeit wichtigsten Erkenntnisse eingegangen.

Halonen (2014) und Deng et al. (2017) betonen die Bedeutung von Farben für die Steigerung der wahrgenommenen Ästhetik und des Interesses an Fotografien. Moshagen und Thielsch (2010) bestätigen ebenfalls, dass Farbe zu den wichtigsten Aspekten für die wahrgenommene Ästhetik von Websites zählt. In der Studie von Kong et al. (2016) wurden über 10.000 Bilder hinsichtlich ihrer Ästhetik bewertet. Hier, und auch in einer ähnlichen Studie von Li und Chen (2009), sind Farben und Farbharmonien das am häufigsten genannte Attribut für die Begründung der ästhetischen Bewertung. Bezüglich Farbharmonien in Bildern geben Leder et al. (2022) zu bedenken, dass eine Vorliebe für höhere Sättigungsgrade besteht, solange Farben gewissermaßen „natürlich“ bleiben. Jedoch wird ein zu hoher Sättigungsgrad als „kitschig“ und nicht mehr ästhetisch empfunden (Leder et al., 2022).

Weiterhin werden generell Bilder mit helleren Farben bei der Betrachtung bevorzugt (Leder et al., 2022).

Neben der Untersuchung von Farben, Farbharmonien und Farbsättigung wurden auch Zusammenhänge zwischen Farben und ästhetischen Inhalten sowie geschlechtsspezifische Unterschiede analysiert. Joye et al. (2013) stellen fest, dass Fotografien mit dem Kontext Natur faszinierender wahrgenommen werden als Bilder mit urbanem Kontext. Dazu wird bemerkt, dass Naturszenen im Gegensatz zu städtischen Szenen intrinsisch farbenreicher sind (Joye et al., 2013).

In der Didaktik wird der Aspekt der Farbe ebenfalls berücksichtigt. Um et al. (2012) definieren warme Farben in Kombination mit runden, anthropomorphen Formen als ein positiv emotionales Design. Plass et al. (2014) schreiben warmen und hellen Farben in einem solchen emotionalen Design eine größere Erregung während einer Lernsequenz zu. Während Plass und Kaplan (2016) eine Erleichterung des Verstehens durch warme Farben und runde, anthropomorphe Formen nachweisen, stellen (Stark, Park & Brünken, 2018) in einer Übersicht zu dieser und ähnlichen Studien fest, dass emotionales (Text-)Design mit warmen Farben keine eindeutigen Schlüsse zu affektiven und kognitiven Effekten zulässt. Smith et al. (2011) konnten hingegen feststellen, dass eine Farbcodierung die Attraktivität von Bildern mit astrophysikalischen Kontext und Inhalten steigern kann.

2.2.3 Visuelle Komplexität

Ein weiterer Punkt der perzeptuellen Analysen in Leders Modell ist die visuelle Komplexität (Leder et al., 2004). Grundlagen hierzu sind Studien mit fundamentalen Ergebnissen von Berlyne in den 1980er Jahren. Dabei erkannte Berlyne sowie darauf aufbauende Studien, dass ein moderates Maß an visueller Komplexität ästhetischer wahrgenommen wird (Berlyne, 1978; Halonen, 2014; Schmidt & Wolff, 2018). Berlyne führte dazu psychologische Experimente zu ästhetischen Präferenzen durch (Berlyne, 1978). Leder und Nadal (2014) schlussfolgern aus Berlyne's Studien, dass ein wahrgenommener geringer Komplexitätsgrad als langweilig empfunden wird, während ein wahrgenommener hoher Komplexitätsgrad als fordernd empfunden wird. Leder et al. (2004) konstatiert dies als „Erregungspotenzial aufgrund visueller Stimulation, bevorzugt auf moderatem Niveau“ (Leder et al., 2004, S. 495). Auch Hansbauer et al. (2016) beziehen sich auf Berlyn's Untersuchungen bei ihren Studien zu Webseiten. Eines ihrer Ergebnisse besagt, dass weniger komplexe Webseiten attraktiver sind als Webseiten mit mittlerer oder hoher Komplexität. In Anbetracht dieser Grundlagen wird bei der hier vorliegenden Arbeit eine geringe bis mittlere Komplexität der Bilder angestrebt.

2.2.4 Symmetrie

Symmetrie hat eine lange Forschungstradition in der Ästhetik, (Leder et al., 2022). Symmetrien lassen Objekte generell schöner und ästhetischer erscheinen (Frith & Nias, 1974; Leder & Nadal, 2014). Das gilt insbesondere bei natürlichen Objekten wie Gesichtern, aber auch bei abstrakten Gemälden (Leder et al., 2022). Zudem helfen Symmetrien, Bildinhalte und Objekte schneller zu erfassen (Kutschera, 1988). Je nach Inhalt spielen dabei inhärente Symmetrieachsen eine Rolle: vertikale Symmetrieachsen z.B. bei Gesichtern sowie horizontale Symmetrieachsen z.B. bei Landschaftsbildern (Leder et al., 2022). Anders sieht die aktive Wahrnehmung von Symmetrien aus: Im Vergleich zu Farbe und Inhalt wird die Symmetrie bei der Bewertung nach Ästhetik weniger bedeutsam wahrgenommen (Kong et al., 2016; Moshagen & Thielsch, 2010). So ist bei Kong das Attribut „Farbharmonie“ bei 60 % der Bilder eines der drei wichtigsten Attribute für die Bildbewertung, das Attribut „Symmetrie“ jedoch nur bei ca. 10 % der Bilder (Kong et al., 2016). Ähnlich wurde der Aspekt „Farbe“ ($M = 4,19$ auf einer Skala von 1 bis 5) in Moshagens Studien bei der Wahrnehmung der Ästhetik von Webseiten mit einem wesentlich höheren Stellenwert gewertet als der Aspekt „Symmetrie“ ($M = 2,39$) (Moshagen & Thielsch, 2010). Andererseits spielt Symmetrie in der Physik eine spezielle Rolle (Zee, 2016). Unter anderem in der modernen Physik sind Symmetrien von entscheidender Bedeutung für das Verständnis grundlegender Strukturen von physikalischen Gesetzen und Theorien, wie beispielsweise in der Teilchenphysik oder Kristallografie (Zee, 2016). Auch bei Phänomenen der geometrischen Optik sind viele Symmetrien intrinsisch gegeben (Hecht, 2018). Bei der Auswahl der Bilder wird daher darauf geachtet, dass diese Symmetrien auch in den Fotografien explizit abgebildet sind.

2.2.5 Ordnung und Gruppierung

Unter den Kriterien der visuellen Wahrnehmung nennt Leder auch die Gestaltprinzipien von Wertheimer (1923). Sie sind fester Bestandteil der Physikdidaktik hinsichtlich der Ordnung und Gruppierung von Bildelementen (Girwidz, 2020b, S. 304; Yang et al., 2023). Auch Moshagen und Thielsch (2010) stellen fest, dass die Einhaltung der Gestaltprinzipien zu einer einfacheren und effizienteren Bildverarbeitung von Webseiten führt. Auch im Gebiet der Kunst werden die Gestaltprinzipien angewendet. Arnheim untersuchte ihre Wirkung und identifizierte sie ebenfalls als wichtigen Bestandteil für die Ästhetik (Arnheim, 1954, zitiert nach Leder et al., 2004): „Gute Gestalten“ werden als ästhetischer wahrgenommen. Die wichtigsten Gestaltprinzipien, die zum ästhetischen Reiz einer visuellen Gestaltung von Fotografien beitragen können, sind folgende:

- Das Prinzip der Nähe besagt, dass näherliegende Elemente bevorzugt zu einem Objekt gruppiert werden.
- Das Prinzip der Ähnlichkeit umfasst die Tendenz, Elemente umso stärker zueinander in Beziehung zu setzen, je ähnlicher sie einander sind.
- Das Prinzip der Geschlossenheit beschreibt die Fähigkeit, Figuren und Linien gedanklich zu vervollständigen, auch wenn sie nicht mehr gezeichnet sind.

Des Weiteren stellen Leder et al. (2004) bei den Gestaltgesetzen fest, dass ein höherer Kontrast oft als vertrauter interpretiert wird und gleichzeitig Vertrautheit die affektive Präferenz erhöht. Darüber hinaus werden klarere Versionen von Bildern gegenüber weniger klaren Versionen bevorzugt (Reber et al., 1998). Damit ist die Beachtung der Gestaltprinzipien nicht nur eine Voraussetzung für ein ästhetisch ansprechendes Bild. Auch allgemein bei der Gestaltung von visuellen Darstellungen im Physikunterricht sollten die Gestaltprinzipien beachtet werden.

2.2.6 Vertrautheit

Im Rahmen der Betrachtung von visuellen Kunstobjekten befassen sich „previous experience“ sowie „familiarity“ mit der Vorerfahrung und Vertrautheit, die ein Betrachter für die jeweilige Objektklasse des Kunstobjekts hat (Leder et al., 2004). Diese Aspekte sind ebenfalls für die subjektive visuelle Ästhetik eines Bildes von Bedeutung (Fenner, 2020; Leder et al., 2004). Zu „previous experience“ und „familiarity“ gibt es sowohl Studien, die eine positive Relation des Aspekts zur wahrgenommenen Ästhetik feststellen, jedoch werden auch negative Relationen gemessen (Halonen, 2014). Leder diskutiert hier, dass der Zugang zu abstrakten Kunstobjekten für Novizen und Experten aufgrund des Vorwissens zwar unterschiedlich ist, es jedoch keine klare Relation zwischen Vorerfahrung und Vertrautheit und ästhetische Emotion zu einem Bild zu erkennen gibt (Leder et al., 2004). Da Vorerfahrung und Vertrautheit für die subjektive visuelle Ästhetik Wahrnehmung und die instruktionale Einbettung der Bilder von Bedeutung sind, wurde in der vorliegenden Arbeit die Phase des Transfers und der Anwendung gewählt. Somit sind die physikalischen Inhalte in der vorliegenden Studie bereits bekannt, jedoch nicht unbedingt verstanden.

Damit wurden in diesem Kapitel Aspekte der subjektiven visuellen Ästhetik vorgestellt, welche als Grundlage für den Kriterienkatalog (siehe Tabelle 2.1) zur Auswahl von ästhetischen Bildern dienen.

2.3 Aspekte für die instruktionale Einbindung von Bildern in eine Multimedia-Umgebung

Im vorherigen Kapitel wurden Aspekte beleuchtet, die zu einer ästhetischen und ansprechenden Bildbetrachtung beitragen können. Für einen erfolgreichen Lernprozess müssen Bilder, wie in Kapitel 2.1.2 dargelegt, jedoch auch instruktional sein. Im Folgenden werden Aspekte und

Anforderungen vorgestellt, die zu einer erfolgreichen instruktionalen Einbindung des Bildes beitragen. Die zugrunde liegenden Theorien haben größtenteils schon den Einzug in einschlägige Standardliteratur gefunden. Daher werden hier nur elementare Punkte und daraus gezogene Schlüsse zusammengefasst.

2.3.1 Aufgaben und Feedback in Multimedia-Umgebungen

Modelle von Mayer und Ainsworth zeigen, dass Bilder grundsätzlich hilfreich im Lernprozess sein können (siehe Kap 2.1.1) (Ainsworth, 2006; Moreno & Mayer, 2007). Dabei gibt es verschiedene Ansätze, wie Bilder konkret eingebunden werden können. In der hier vorliegenden Arbeit werden Bilder mittels Aufgaben integriert. Damit Aufgaben zum Lernziel führen, werden sie in einer systematisch geplanten Sequenz eingesetzt (Kauertz & Fischer, 2020, S. 450). Ihre Reihenfolge richtet sich nach der Logik, mit der Inhaltselemente aufeinander aufbauen. Durch die Nutzung einer Multimedia-Umgebung bestand die Möglichkeit der Einbindung von Feedback. Daher werden im Folgenden Grundlagen zu Feedback erläutert.

Folgt auf die Beantwortung einer Frage ein Feedback, kann dies gezielt zur Beantwortung der nächsten Aufgabe genutzt werden und somit der weitere Lernprozess gesteuert werden (Baadte & Schnotz, 2014). Generell kann Feedback einen sehr großen Einfluss auf den Lernerfolg haben, wie hohe Effektstärken von Studien zu Feedback im Allgemeinen zeigen (Hattie & Timperley, 2007). van der Kleij et al. (2015) hebt in seiner Meta-Analyse vor, dass auch von einer Software generiertes Feedback zum Lernerfolg verhelfen kann. Deeva et al. (2021) sowie Hattie und Gan (2011) betonen die Stärke von personalisiertem und individuellen Feedback. In einer interaktiven Lernumgebung kann dieses Feedback als Lernunterstützung dem jeweiligen Lernenden direkt und individuell angepasst gegeben werden (Kauertz & Fischer, 2020). In der vorliegenden Arbeit soll das Feedback keine primär motivierende Funktion haben und der Fokus liegt hier auch nicht auf Lernstrategien. Daher wird Feedback hier „nur“ auf der Aufgaben- und Prozessebene gegeben. Auf Feedback auf der Ebene der Selbstregulation, vgl. (Hattie & Timperley, 2007), wird verzichtet.

Mit der interaktiven Lernumgebung und der Möglichkeit von Feedback kann das Arbeiten mit Bildern und der Einfluss der Bilder für jeden Lernenden individuell untersucht werden. Des Weiteren ist der individuelle Faktor zentral, da Ästhetik auch eine persönliche Komponente hat und daher die ästhetische Emotion zu einem Objekt von Person zu Person unterschiedlich ist (Leder et al., 2004). Daher muss die Wahrnehmung der visuellen Ästhetik für jede einzelne Personen individuell untersucht werden und die Arbeitsform Einzelarbeit wird gewählt. Ebenso wie der Lernprozess und die Ästhetik, sind auch Interesse und interessante Kontexte etwas Individuelles.

2.3.2 Kontext und Interesse

Eine weitere Funktion von Bildern ist die Kontextualisierung der physikalischen Inhalte. Ein fachlicher Inhalt kann nur dann effektiv gelernt werden, wenn er in einem für Schülerinnen und Schüler relevanten Kontext präsentiert wird (Mikelskis-Seifert & Duit, 2007). Daher sollten Kontexte so gewählt werden, dass sie für die Lernenden „sinnstiftend“ sind (Muckenfuß, 1995). Die Einbettung in sinnstiftende Kontexte weckt das Interesse und motiviert die Schülerinnen und Schüler für das Erlernen des fachlichen Inhalts (Mikelskis-Seifert & Duit, 2007).

Dabei ist es nach der Interessentheorie von Krapp wichtig sowohl situationales als auch individuelles Interesse zu berücksichtigen (Krapp, 1992). Situationales Interesse wird durch ansprechende und relevante Kontexte geweckt, während individuelles Interesse durch wiederholte positive Erfahrungen und vertiefte Auseinandersetzung mit dem Thema entwickelt wird (Krapp, 1992). Daher sollten Unterrichtsinhalte so gestaltet werden, dass sie zunächst das situationale Interesse der Lernenden ansprechen und gleichzeitig Gelegenheiten bieten, dieses Interesse zu einem stabilen, individuellen Interesse zu entwickeln (Krapp, 1992). Ein gesteigertes Interesse kann die Bereitschaft und die Ausdauer beim Lernen erhöhen sowie ein intensiveres und konzentrierteres Lernen fördern und kognitive Strategien aktivieren, die zu einer tieferen Ausarbeitung führen (Schiefele und Krapp, 1996, zitiert nach Lenzner et al., 2013).

Im Gegensatz zu kontextorientiertem Unterricht gibt es fachsystematische Ansätze, die Experimente in den Vordergrund stellen. Der Vorteil der Fachsystematik liegt in ihrer weiterführenden Vertiefung und der Möglichkeit, Ablenkungen zu minimieren. Fachsystematischer Unterricht sowie kontextorientierter Unterricht sollten integriert werden (Kuhn et al., 2010). Eine Integration beider Ansätze kann dazu beitragen, sowohl Fachwissen als auch nachhaltiges Interesse zu fördern (Kuhn et al., 2010). Durch die Verbindung von sinnstiftenden Kontexten mit fundierter fachlicher Systematik kann ein lernförderliches Umfeld geschaffen werden, das die Motivation und das Interesse der Schülerinnen und Schüler langfristig unterstützt.

Sinnstiftende und motivierende/interessante Kontexte können alltägliche Themen aus dem Leben der Schülerinnen und Schüler sein, wie z.B. alltägliche Phänomene oder technische Anwendungen, jedoch auch die Bedeutung der Physik für Technik und Gesellschaft (Mikelskis-Seifert & Duit, 2007). Die Interessenstudie des Leibniz-Instituts für die Pädagogik der Naturwissenschaften hat die Kontexte „Mensch und Natur“ sowie „Physik und Gesellschaft“ herauskristallisiert, die von 80% der Schülerinnen und Schüler als bedeutsam angesehen werden (Bennett, 2016; Hoffmann et al., 1998). Insbesondere ist der Kontext „Natur“ für Mädchen und Jungen gleichermaßen interessant (Hoffmann, 2002; Hoffmann et al., 1998; Labudde & Metzger, 2019).

Für die instruktionale Einbindung der Bilder muss also auf die sorgfältige Auswahl eines relevanten Kontextes geachtet werden, der die Lernmotivation erhöht und das Interesse der Schülerinnen und Schüler stärkt.

2.3.3 Bearbeitungszeit

Eine interaktive Lernumgebung erlaubt es, die Bearbeitungszeit für jede Aufgabe detailliert zu erfassen. Dies kann Hinweise auf die Lernintensität liefern. Seitdem es die technische Möglichkeit gibt, bei Lernprozessen nicht nur die Korrektheit der Antworten, sondern auch die Bearbeitungszeit zu erfassen, beschäftigen sich zahlreiche Studien mit Variablen wie „time on task“ oder „response time“ (Goldhammer et al., 2014; Scheuermann & Björnsson, 2009). Weitere systematische Übersichten weisen auf komplexe Befunde hin: Ob eine längere Bearbeitungszeit zu einem besseren Antwortgenauigkeit führt, hängt von Fachgebiet, Aufgabentyp, persönlichen Fähigkeiten und der Aufgabenschwierigkeit ab (Goldhammer et al., 2014; Scherer et al., 2015). Zum Beispiel deutet eine längere Bearbeitungszeit bei Problemlöseaufgaben auf eine intensivere Beschäftigung hin, und je mehr Zeit aufgewendet wird, desto mehr richtige Antworten werden gegeben (Scherer et al., 2015). Gleichzeitig ist bei Aufgaben niedrigen Schwierigkeitsgrads mit instruktionalen Bildern die Bearbeitungszeit von engagierten Lernern kürzer (Goldhammer et al., 2014). Dies wird damit begründet, dass Lernende mit höherem Qualifikationsniveau den Inhalt schneller erfassen und daher weniger Zeit für die Beantwortung solcher Aufgabe benötigen (Goldhammer et al., 2014; Lindner, 2020; Lindner et al., 2017). Goldhammer et al. (2014) bemerken, dass auch das Engagement ein Indikator für die Bearbeitungszeit sein könnte. Für eine solche Untersuchung benötige es allerdings „umfangreiche Prozessdaten“ (Goldhammer et al., 2014, S. 623), die eine feinere Analyse ermöglichen.

Die in der vorliegenden Arbeit erstellten Lernaufgaben sind teilweise problemlösend, sodass eine längere Bearbeitungszeit auf eine tiefere Beschäftigung mit dem physikalischen Inhalt hindeuten könnte. Andererseits könnten die physikalischen Inhalte der Bilder von Lernenden mit hohem Vorwissen schneller erfasst werden und damit eine kürzere Bearbeitungszeit auf eine effektivere Bearbeitung der Aufgaben hinweisen. Daher ist sowohl ein positiver als auch ein negativer Zusammenhang zwischen Bearbeitungszeit und Antwortrichtigkeit möglich.

2.3.4 Blickrichtung

Nicht nur Text wird unter anderem im europäischen Raum von links nach rechts gelesen. Auch bei der Vorführung von Demonstrationsexperimenten ist es für das Leiten der Aufmerksamkeit hilfreich, zeitlich hintereinander laufende Prozesse räumlich von links nach rechts aufzubauen und zu erklären (Girwidz, 2020a; Schweinberger et al., 2023). Studien im Bereich der Kunst bestätigen, dass in westlichen Kulturen auch Objekte in Bildern von links nach rechts wahrgenommen werden (Wilson &

Chatterjee, 2005). Daher wird bei der Auswahl und insbesondere beim Erstellen von Bildern von Experimenten darauf geachtet, eine sinnvolle Anordnung der Objekte von links nach rechts einzuhalten.

2.3.5 Phase im Lernprozess und Aufgabentyp

Der Ablauf einer Unterrichtsstunde kann in verschiedene Phasen eingeteilt werden, wie die Phase der Motivation oder die Phase des Behaltens und Einübens (Krabbe & Fischer, 2020). Es gibt jedoch keine eindeutige oder feste Lösung für die „beste“ Abfolge von Lernschritten, da je nach Themenbereich andere Randbedingungen vorgegeben werden. Daher gibt es verschiedene anerkannte Modelle für einen sinnvollen Ablauf eines Unterrichts. Gemein haben die Modelle eine Einführungsphase zu Anfang, gefolgt von einer Übungsphase, einer Wissensvertiefungs- und Transferphase, und schließlich einer Testphase (Krabbe & Fischer, 2020). Je nach Phase ergeben sich dabei verschieden Ziele des Unterrichts. Damit variiert wiederum die Gestaltung von Aufgaben (Kauertz & Fischer, 2020). Das bedeutet, dass vor der Erstellung der Aufgaben die Unterrichtsphase festgelegt werden muss. In der Phase des Transfers und Anwendung ist bereits ein bestimmtes Vorwissen bei den Schülerinnen und Schülern vorhanden. Dieses Wissen soll vertieft und mit weiteren Kontexten bearbeitet werden. In Bildern in einer Lernumgebung kann der Kontext gezielt variiert werden, während das physikalische Phänomen dasselbe bleibt.

2.3.6 Zusammenfassung der Kriterien

In der folgenden Tabelle 2.1 werden die in den Kapiteln 2.2 und 2.3 vorgestellten Kriterien zur Auswahl ästhetischer Bilder für den Physikunterricht zusammenfasst. Diese werden in Kapitel 4.1 auf die ausgesuchten Bilder angewendet.

Tabelle 2.1: Kriterienkatalog zur Auswahl ästhetischer Bilder für den Physikunterricht

Kriterium	Ausrichtung und Literaturhinweise
<i>Ästhetische Kriterien</i>	
Farbe	Grundlegendes Merkmal ästhetischer Objekte; allgemeine Präferenz für gesättigtere Farben, solange natürliche Farbtöne erhalten bleiben. Literatur: (Deng et al., 2017; Halonen, 2014; Joye et al., 2013; Leder et al., 2004; Moshagen & Thielsch, 2010; Plass et al., 2014)
Kontrast	Präferenz für hohe Kontraste Literatur: (Leder et al., 2004)
Visuelle Komplexität	Präferenz für ein moderates Maß an visueller Komplexität Literatur: (Berlyne, 1974; Leder et al., 2004; Schmidt & Wolff, 2018)
Symmetrie	Falls der Inhalt eine Symmetrie aufweist, sollte das Bild der Symmetrie folgen. Literatur: (Leder et al., 2022)
Ordnung und Gruppierung	Objekte stehen nicht irreführend nah beieinander. Elemente, die eine größere Ähnlichkeit aufweisen, werden als zusammengehörig wahrgenommen. Literatur: (Girwidz, 2020b; Leder et al., 2004; Moshagen & Thielsch, 2010; Wertheimer, 1923)
Vertrautheit	Das Erkennen vertrauter visueller Elemente oder Strukturen wird als belohnende Erfahrung wahrgenommen und löst positive emotionale Reaktionen aus. Literatur: (Leder et al., 2004)
<i>Affektive Kriterien</i>	
Kontext	Bestimmte Kontexte können Interesse und weitere affektive Variablen erhöhen. Literatur: (Bennett, 2016; Hoffmann, 2002; Joye et al., 2013; Kaplan & Kaplan, 1989; Muckenfuß, 1995)
<i>Praktische Kriterien</i>	
Thema	Der physikalische Inhalt ist relevant für Lehrinhalte und Lernziele.
Inhalt	Das Bild stellt das physikalische Phänomen klar und verständlich dar; es hat das Potenzial, eine Lernaufgabe zu schaffen.
Nutzungsrechte	Sicherstellung der Rechte für den Einsatz im Unterricht.

2.4 Optik in der Sekundarstufe I

Geometrische Optik ist für Fotografien ein intrinsisch passendes Thema, da für die Erstellung von solchen Bildern optische Geräte genutzt werden. Zusätzlich können Phänomene der geometrischen Optik leicht gesehen werden und damit auch leicht mit einer Kamera eingefangen werden und zu Papier bzw. Bildschirm abgebildet werden. Somit ergibt sich hier eine große Vielfalt an Bildern, sodass auf die vorangehenden Kriterien und Aspekte Rücksicht genommen werden kann. Daher werden im Folgenden die physikalischen Grundlagen der geometrischen Optik vorgestellt. Abschließend wird die Einbindung der geometrischen Optik in den Lehrplan von Gymnasien und Realschulen in Bayern erläutert.

2.4.1 Das Strahlenmodell der geometrischen Optik

Im Alltag, sei es im Verkehr, bei Reflektionen am Badezimmerspiegel oder in der Anwendung technischer Instrumente wie einfachen Mikroskopen, Fernrohren und Brillen, stellt das Strahlenmodell eine plausible und praktikable Näherung der physikalischen Sachverhalte dar (Euler, 2020). Das Verhalten von Wellenfronten an reflektierenden und/oder brechenden Flächen wird angenähert und mit geradlinigen Lichtstrahlen beschrieben. Beugungseffekte werden dabei außer Acht gelassen (Hecht, 2018). Die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Phänomene Lichtausbreitung an Hindernissen, die Reflexion an Spiegeln und die Brechung an dicken Linsen können damit erklärt werden (Demtröder, 2017), insbesondere schülergerecht für die Zielgruppe Sekundarstufe I. Das Spektrum des Lichts wird im Lehrplan als Beispiel genommen, um Grenzen des Strahlenmodells zu zeigen.

2.4.2 Geometrische Optik im Lehrplan in Bayern und Aufbau der Lerneinheit

In deutschen Lehrplänen ist Optik fest verankert (KMK, 2004, 2024). Die genauen Lehrpläne in den jeweiligen Bundesländern basieren auf gemeinsamen Bildungsstandards; die genaue Umsetzung lässt jedoch Freiräume für jedes Bundesland zu (KMK, 2024). Da die vorliegenden Studien ausschließlich an bayrischen Schulen durchgeführt wurden, werden hier nur Inhalte des bayrischen „LehrPlanPlus“ (ISB, 2024) zur geometrischen Optik erläutert. Der LehrplanPlus enthält unter anderem Fachlehrpläne, die nach Schulart, Wahlpflichtfächergruppe und Klassenstufen gegliedert sind (ISB, 2024). Die einzelnen Fachlehrpläne beinhalten sowohl Kompetenzerwartungen als auch die entsprechenden Inhalte (ISB, 2024).

Die Probanden der Studien stammen aus 7. Klassen einer Realschule, Wahlpflichtfächergruppe I (naturwissenschaftlicher Zweig) sowie aus 8. Klassen von Gymnasien. Im Gymnasium wird die geometrische Optik auf die 7. Klasse (Natur und Technik Unterricht) und die 8. Klasse (Physik Unterricht) aufgeteilt (ISB, 2024). Lernende am Gymnasien haben nach der 8. Klasse

etwa denselben Kenntnisstand in den hier behandelten Lerninhalten wie Lernende aus der Realschule mit Wahlpflichtfächergruppe I nach der 7. Klasse. Daher wird im Folgenden nur auf den Lehrplan der 7. Klasse der Realschule in der Wahlpflichtfächergruppe I tiefer eingegangen. Die wichtigsten Unterschiede für Lernende des Gymnasiums werden anschließend kurz erläutert.

Inhaltlich ist der exemplarische Aufbau der Optikeinheit der Realschule Klasse 7, Wahlpflichtfächergruppe I, wie folgt gestaltet (nach ISB, 2024): Zunächst werden mit dem Sender-Empfänger-Modell Grundlagen des Sehens erarbeitet. Dabei wird das Strahlenmodell eingeführt und die Lichtgeschwindigkeit thematisiert. Die Schülerinnen und Schüler sollen ihre bisherigen Vorstellungen zum Strahlenmodell kritisch reflektieren und gegeben falls verbessern. Anschließend wird auf Phänomene wie Schatten und Finsternisse eingegangen, wobei die Kompetenzen im Skizzieren und Begründen verbessert werden sollen. Hierbei wird auch auf die Verwendung der Fachsprache geachtet. Darauf aufbauend wird das Thema Reflexion behandelt, mit Beispielen aus dem Alltag wie Reflexionen bei Spiegeln, Straßenschildern und Reflektoren am Fahrrad. Auch die diffuse Reflexion wird thematisiert. Der nächste Themenbereich behandelt die Brechung an Grenzflächen, die Totalreflexion und die Grenzen des Strahlenmodells am Beispiel der Dispersion und dem kontinuierlichen Spektrum. Schließlich wird das Strahlenmodell verwendet, um die Konstruktionen von Abbildungen durch Sammellinsen und optischen Geräten zu erklären. Dabei wird auf die Entstehung reeller und virtueller Bilder eingegangen. Ein Ausblick auf die Geschichte optischer Geräte sowie die Funktion des Auges und die Korrektur von Fehlsichtigkeit runden die Lerneinheit ab.

In Gymnasien werden in der 7. Klasse im Natur und Technik Unterricht auch die Themenbereiche Lichtausbreitung und Farben behandelt. Die Themenbereiche Reflexion und Brechung werden in der 8. Klasse in Physik unterrichtet. Dadurch können in Gymnasien insbesondere Strahlengänge in Sammel- und Zerstreuungslinsen umfassender behandelt werden, da bis dahin mehr mathematische Kenntnisse vorhanden sind. Somit bietet die geometrische Optik mit der Behandlung der Themenbereiche Brechung, Reflexion und Spektrum eine ideale Basis, um die Aspekte der Ästhetik im Physikunterricht in Realschulen sowie Gymnasien zu untersuchen.

3 Forschungsfragen und Hypothesen

In Kapitel 2 wurden Kriterien einer Bildauswahl und Aspekte der Einbettung von Bildern in den Physikunterricht beleuchtet. Dabei wurde festgestellt, dass instruktionale Bilder erfolgreich in den Lernprozess eingebunden werden können. Auf der anderen Seite gelten dekorative Bilder als initiale Blickfänger und kontextgebende Elemente, welche das Interesse an dem physikalischen Inhalt steigern können (siehe Kapitel 2.3.2). In der Didaktik sind die Ergebnisse rein dekorativer Bilder bezüglich des Lernerfolgs uneindeutig. Jedoch wurden diese Bilder nicht nach Kriterien der Ästhetik ausgewählt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Fotografien implementiert, die gleichzeitig dekorativ und instruktional sind. Theoretisch begründete Kriterien zur wahrgenommenen visuellen Ästhetik aus Kapitel 2.2 werden angewendet, um sicherzustellen, dass die Bilder als dekorativ und ansprechend wahrgenommen werden. Die so ausgewählten Bilder sind hypothetisch ästhetische Bilder und werden daher nachfolgend als AP („aesthetic picture“) bezeichnet. Als Kontrast zu den APs kommen Bilder von Experimenten in einem Klassenzimmer-Setting zum Einsatz, welche als CEP („classroom experiment picture“) benannt werden. Die CEPs werden bewusst weniger ästhetisch gestaltet, was aufgrund ihrer Nutzung nicht zwangsläufig einen Nachteil darstellt. Denn der geringeren Attraktivität wird steht gegenüber, dass das CEP schlicht und fachlich ist, wodurch es möglicherweise schneller und einfacher an das physikalische Phänomen heranführen kann. Somit haben die CEPs durchaus das Potential, das Lernen auf eine andere Art und Weise zu erleichtern.

3.1 Forschungsfragen und Hypothesen zur Bildwahrnehmung

Für die Untersuchung des Lernfortschritts mit APs und CEPs wurde eine interaktive Lernumgebung mit beiden dieser Bildarten erarbeitet, die in Kapitel 4.2.8 vorgestellt wird. Mit Hilfe eines Fragebogens zur ästhetischen und affektiven Wahrnehmung von Bildern wurde anschließend untersucht, inwieweit die ausgewählten Bilder als visuell ästhetisch wahrgenommen werden. Auf dieser Grundlage wurden *a priori* die folgenden Forschungsfragen formuliert:

Forschungsfrage 1: Nehmen die Schülerinnen und Schüler die ausgewählten ästhetischen Bilder als ästhetischer wahr als weniger ästhetische Bilder von Experimenten im Klassenzimmer? (Ästhetisches Bild bezieht sich hier auf ästhetische Bilder nach den vorgegebenen Kriterien).

Hypothese 1: Schülerinnen und Schüler bewerten die ausgewählten ästhetischen Bilder hinsichtlich ästhetischer und affektiver Bildwahrnehmung besser als die Bilder von Experimenten in Klassenzimmern.

Forschungsfrage 2: Mit welchen Begründungen nehmen die Schülerinnen und Schüler die ausgewählten ästhetischen Bilder als ästhetischer wahr als weniger ästhetische Bilder von Experimenten im Klassenzimmer?

In einer Folgeuntersuchung wurde nach zusätzlichen Informationen über die Gründe für die ästhetische und affektive Bildwahrnehmung gesucht. Dazu wurden weitere Probanden in Interviews gefragt, nach welchen Kriterien sie ihr Gefallen für bestimmte Bilder begründen. Zudem wurde die Relevanz der Kriterien Farbe, visuelle Komplexität und Kontrast, sowie zu den Kontexten der Bilder thematisiert.

3.2 Forschungsfragen und Hypothesen bezüglich des Lernens

Die interaktive Lernumgebung wurde in eine Studie eingebettet, die es erlaubt, den Wissensstand sowie Prädiktorvariablen zu erheben, siehe Kapitel 4.2.4. Dabei wird unter anderem der Wissensstand vor und nach dem Arbeiten mit Bildern sowie die Bearbeitungszeit der Aufgaben bei ausgewählten Schülerinnen und Schülern erhoben.

Forschungsfrage 3: Wirkt sich das Arbeiten mit ästhetischen Bildern positiv auf den Wissenszuwachs in den jeweiligen Themenbereichen aus?

Hypothese 3: Schülerinnen und Schüler haben bei den Themenbereichen einen größeren Wissenszuwachs in Konzepten der geometrischen Optik, bei denen sie Aufgaben mit ästhetischen Bildern bearbeiten, als bei den Themenbereichen, bei denen sie Aufgaben mit Bildern von Experimenten im Klassenzimmer bearbeiten.

Forschungsfrage 4a: Lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Bearbeitungszeit (time on task) bei den Lernaufgaben und der jeweiligen Bildkategorie feststellen?

Hypothese 4a: Das Arbeiten mit ästhetischen Bildern führt zu einer längeren Beschäftigung mit dem Bildmaterial.

Forschungsfrage 4b: Führen unterschiedliche Bearbeitungszeiten zu einer Veränderung der Antwortrichtigkeit in der Lernumgebung?

Hypothese 4b: Eine längere Bearbeitungszeit führt zu besseren Ergebnissen bei den Lernaufgaben.

4 Material und Methoden

Für die Untersuchung der Forschungsfragen wird zunächst ein Katalog von Kriterien für die Auswahl von ästhetischen Bildern im Physikunterricht zusammengestellt. Dabei wird auf die im Kapitel 2.2 und 2.3 vorgestellten Grundlagen und theoretischen Hintergründe eingegangen. Kapitel 4.1.1 stellt diesen Kriterienkatalog vor. Anschließend wird im Kapitel 4.1.2 der Kriterienkatalog für die Auswahl der ästhetischen Bilder eingesetzt.

Neben dem Kriterienkatalog zur Auswahl der ästhetischen Bilder bilden die Studien mit Schülerinnen und Schülern einen zweiten Schwerpunkt dieser Arbeit. In der ersten Studie werden affektive sowie kognitive Einflüsse von Bildern auf den Lernvorgang sowie die ästhetische und affektive Wahrnehmung der Bilder untersucht. Dazu werden Bilder in eine Lernumgebung mit den Themenbereichen Lichtausbreitung, Spektrum, Reflexion und Brechung eingebunden. In Doppelstunden wird die Studie mit Lernumgebung und psychometrischen Tests mit Schülerinnen und Schülern durchgeführt. Diese Studie erfolgte in den jeweiligen Schulen; daher wird diese Studie im Folgenden „Schulstudie“ genannt. Die Schulstudie wird in Kapitel 4.2 vorgestellt. In einer zweiten Studie wird den Hintergründen für die Bewertung der Bilder nach ästhetischen und affektiven Kriterien genauer nachgegangen. Dazu werden Schülerinnen und Schülern in einem Leitfadeninterview zu den Bildern befragt. Daher wird die zweite Studie „Interviewstudie“ genannt. Sie wird in Kapitel 4.3 vorgestellt.

4.1 Auswahl der Bilder

Die Auswahl der ästhetischen Bilder (AP) folgt nach den in Kapitel 2.2 und 2.3 genannten Kriterien für dekorative und instruktionale Bilder. Große Datenbanken wie das IAPS oder NAPS mit bereits nach ästhetischen Kriterien bewerteten Bildern beinhalten jedoch für die Fachphysik nicht genügend spezifische Bilder (Scharinger, 2023). Auf Seiten physikalischer Institutionen wie das „National Aeronautics and Space Administration (NASA)“, die „Universities Space Research Association“ oder bei den Fotowettbewerben der „American Association of Physics Teachers“ lassen sich Fotografien mit physikalischen Phänomenen finden, die jedoch nicht zwingend ästhetischen Kriterien folgen. Schließlich gibt es Webseiten wie „Flickr“, die Fotografien ohne ästhetische Bewertung und vereinzelt physikalischen Inhalten zeigen. Für die weniger ästhetischen Bilder von Experimenten im Klassenzimmer (CEP) waren die Anforderungen so spezifisch, dass diese eigenständig erstellt werden mussten, siehe auch Kapitel 4.1.2. Im Folgenden Kapitel 4.1.1 werden nötige Details der praktischen Umsetzung einiger Kriterien sowie eine exemplarische Umsetzung aller Kriterien erläutert. In Kapitel 4.1.2 werden die in den Studien verwendeten Bilder vorgestellt (APs und CEPs) und jeweils auf die Umsetzung der Kriterien eingegangen.

4.1.1 Kriterien zur Auswahl ästhetischer Bilder

Bei der Auswahl der APs wurden die Kriterien nacheinander angewandt. Eine praktische Vorgehensweise bei der Auswahl der Bilder findet sich im Anhang in Kapitel A.1. Im Folgenden wird auf praktische Aspekte einiger Kriterien tiefer eingegangen. Anschließend präsentiert Tabelle 4.1 die Umsetzung aller Kriterien aus Tabelle 2.1 anhand von zwei exemplarisch ausgewählten Bildern.

Farbe und Kontrast: Bei der Bildauswahl wurde sowohl auf die Farbe als auch auf den Kontrast und Farbtiefe geachtet. Bilder mit kräftigen Farben sind auffälliger, daher ist dieses Kriterium gut umsetzbar um eine Vorauswahl zu reduzieren. Das Kriterium „Kontrast“ wurde bei der näheren Bildauswahl herangezogen, um zwischen Bildern weiter zu differenzieren.

Symmetrie: Symmetrieachsen oder -punkte werden größtenteils durch die physikalischen Phänomene bei einer Anordnung der Bildelemente vorgegeben. Es werden ausschließlich Bilder berücksichtigt, die diese Symmetrien wiedergeben.

Relevanz des physikalischen Phänomens: Der Lehrplanbezug ist essentiell für einen erfolgreichen und sinnvollen Einsatz des Bildes im Physikunterricht und daher eine zwingend notwendige Bedingung. So ist ein fluoreszierender doppelbrechender Kristall zwar vom Inhalt her ansprechend, jedoch nicht für eine Untersuchung an der Schule geeignet.

Sichtbarkeit des physikalischen Phänomens und visuelle Komplexität: Es ist zusätzlich notwendig, dass das physikalische Phänomen klar auf dem Bild zu sehen ist. Hier sind auch die Gestaltprinzipien und die visuelle Komplexität mitentscheidend. Es wurde auch darauf geachtet, dass die physikalischen Objekte einen möglichst großen Bildanteil einnehmen. Bezüglich der Gestaltprinzipien (siehe Kapitel 2.2.5) wurde das Prinzip der Nähe und der Ähnlichkeit beachtet und damit insbesondere Wert auf die Trennung von Vorder- und Hintergrund gelegt.

Bildnutzungsrechte: Eine Fotografie ohne passende Nutzungsrechte wird für den Einsatz grundsätzlich nicht ausgewählt. Passende Nutzungsrechte müssen mindestens enthalten, dass die Fotografie mit Autorennachweis in der Studie gezeigt werden darf. Voreinstellungen der Filter bei der Suche im Internet und das Nutzen von bestimmten Webseiten und Fotodatenbanken erleichtern die Einhaltung dieses Kriteriums. Teilweise wird dadurch wiederum das Auffinden von ästhetischen Bildern mit physikalisch relevantem Inhalt deutlich erschwert. Daher wurde dieses Kriterium als Präferenz Voreinstellung in Filtern von Suchmaschinen abgeschwächt und gegebenenfalls die Fotografen nach einer Nutzungserlaubnis gebeten. Bilder ohne Nutzungsrechte wurden dennoch auch betrachtet, um die Suche nach weiteren Bildern zu vereinfachen.

Personen: Bilder, die Personen zeigen, werden nicht in Betracht gezogen.

Tabelle 4.1: Konkrete Berücksichtigung der Kriterien bei zwei repräsentativen Bildern.

Kriterium	Berücksichtigung der Kriterien bei einem repräsentativen AP 	Berücksichtigung der Kriterien bei einem repräsentativen CEP 
Ästhetische Kriterien		
Farbe	Das Bild beinhaltet mit grünen und blauen Farbtönen recht vielseitige Farben.	Es gibt nur Schwarz-Weiß Töne, daher ist dieses Bild nicht farbig.
Visuelle Komplexität	Es sind nicht viele Objekte zu sehen: Der Himmel, ein Berg, Bäume und ihre Spiegelungen in einem Bergsee. Es gibt also einige, aber keine irrelevanten Objekte in diesem Bild. Damit ist die visuelle Komplexität mittel.	Es sind nicht viele Objekte vorhanden: ein schwarzer Hintergrund, ein weißer Vordergrund, ein Spiegel, ein Großbuchstabe F und sein Spiegelbild. Es gibt also einige, aber keine irrelevanten Objekte in dem Bild. Damit ist die visuelle Komplexität mittel.
Kontrast	Dunkle und helle Farben wechseln sich ab und ergeben einen hohen Farbkontrast.	Schwarze und weiße Farben wechseln sich ab und ergeben einen sehr hohen Kontrast.
Ordnung und Gruppierung	Durch den hohen Farbkontrast sind die Objekte entweder klar voneinander zu unterscheiden oder werden in Gruppen zusammengefasst. Es gibt keine irreführenden Linien.	Durch den hohen Kontrast sind die Objekte deutlich voneinander zu unterscheiden. Es gibt keine irreführenden Linien.
Vertrautheit	Das physikalische Phänomen Reflexion ist leicht erkennbar und damit bekannt, jedoch nicht unbedingt vollständig verstanden. Bei einer Szene aus der Natur kann davon ausgegangen werden, dass sie ebenfalls vertraut ist.	Das physikalische Phänomen Reflexion ist leicht erkennbar und damit bekannt, jedoch nicht unbedingt vollständig verstanden. Die Bildelemente und die Szene sind in der 7. und 8. Klasse eher weniger vertraut.
Inhaltsbezogene Kriterien		
Thema	Optik ist Teil des Lehrplans der Schule in Bayern. Das Thema Reflexion wird in der 7. bzw. 8. Klasse behandelt, siehe Kapitel 2.4.2.	
Inhalt	Alle für die Reflexion relevanten Objekte sind sichtbar: der Berg als Objekt, der See als optischer Spiegel	Alle für die Reflexion relevanten Objekte sind sichtbar: der schwarze Buchstabe F als Objekt,

	und der reflektierte Berg als optisches Bild.	der Spiegel als optischer Spiegel und der reflektierte Buchstabe F als optisches Bild.
Kontext	Natur ist nach Kapitel 2.3.2 ein interessanter Kontext und kann die Lernenden motivieren.	Ein Experiment mit einem Spiegel im Klassenzimmer ist ein potenziell weniger motivierender Kontext.
<i>Sonstige Anforderungen</i>		
Nutzungsrechte	Das Bild wird von Oregon's Mt. Hood Territory (2005) zu Verfügung gestellt.	Das Bild wurde von der Autorin erstellt.
Art der visuellen Darstellung	Die Art beider visueller Darstellungen ist eine Fotografie.	

4.1.2 Auswahl und Präsentation der Bilder

Nach den in Kapitel 2.2 und 2.3 vorgestellten Kriterien wurden sieben APs für den Einsatz in der Lernumgebung ausgewählt. Ebenso wurden sieben CEPs erstellt. Für die Bewertung wurden aus den Themenbereichen Lichtausbreitung, Spektrum, Reflexion, Brechung je ein Bild für die ästhetische und affektive Bildwahrnehmung bestimmt. Die Eigenschaften dieser Bilder werden im Folgenden zunächst generell und dann spezifisch für jedes Bildpaar vorgestellt. In der darauffolgenden Tabelle 4.2 wird die Umsetzung der Kriterien konkret bei den acht ausgewählten Bildern gezeigt.

Generelle Gemeinsamkeiten der Bilder sind eine mittlere Komplexität und hohe Kontraste. Die Einhaltung der Gestaltgesetze wurde bei der Auswahl der APs berücksichtigt. Bei den CEPs wurde bereits beim Erstellen der Bilder auf die Einhaltung der Gesetze geachtet. Die Bildpaare zeigen jeweils das gleiche Phänomen. Daher ist bei beiden gleich viel bzw. hier eher weniger Vorwissen nötig, um das gezeigte physikalische Phänomen erfassen zu können. Bei allen Bildern wurde darauf geachtet, dass alle für das physikalische Phänomen relevanten Objekte sichtbar sind, soweit dies technisch möglich ist. Schließlich sind alle Bilder von der gleichen Art der visuellen Darstellung, nämlich Fotografien. Generelle Unterschiede der Bilder liegen in der Farbigkeit. APs sind grundsätzlich bunter als CEPs. Des Weiteren haben APs Natur als potenziell interessanteren Kontext. Dadurch ist es bei APs nicht immer möglich, irrelevante Objekte im Bild zu vermeiden. Dagegen zeigen die CEPs ein Experiment in einem Klassenzimmer und haben damit einen potenziell weniger interessanten Kontext. Eine geringe Anzahl von irrelevanten Objekten in den CEPs ließ sich weitestgehend umsetzen.

Bildpaar zum Themenbereich Lichtausbreitung

Beide Bilder zum Themenbereich Lichtausbreitung zeigen eine Lichtquelle, ein Hindernis für das Licht von dieser Lichtquelle und den daraus resultierenden Schattenraum auf einem Schirm. Im AP

sind diese Objekte Teil eines Sonnenauf- bzw. Sonnenuntergangs. Im CEP wird eine in Physiksammlungen übliche Lampe, Holzblöcke und ein weißer Papierbogen verwendet.

Es gibt zahlreiche Fotografien, die Sonnenauf- bzw. Sonnenuntergänge zeigen. Die Auswahl wird wesentlich eingeschränkt, wenn sowohl die Lichtquelle Sonne als auch Wolken als Hindernis und eine dunstige Atmosphäre als Schirm mit Schattenräumen sichtbar sein sollen. Das Phänomen lässt die Wahl einer Symmetrie im Bild zu, sodass bei der Bildauswahl auf ein weitgehend symmetrisches Bild geachtet wurde. Wegen Bildrechten wird hier ein Platzhalter für das in der Studie verwendete AP gezeigt. Beide ästhetischen Bilder weisen kräftige Farben auf. Das in der Studie verwendete AP hat im Unterschied zum hier gezeigten Bild im Vordergrund Wasser. Dadurch sind weniger störende oder potenziell ablenkende Objekte im Bild. Auch die Assoziationen bezüglich des Kontextes sind anders, wenn sie auch weiterhin Natur und potenziell Urlaub sind.

Im zugehörigen CEP fallen Farben weg. Die Lampe und die Holzblöcke sind symmetrisch im Bild positioniert. Störende Objekte sind nicht vorhanden. Die Holzblöcke sind den Gestaltprinzipien nach so positioniert, dass sie leicht als zusammenhängend erkannt werden können. Bei dem CEP ist die Leserichtung von links nach rechts eingehalten; die Bildquelle ist links im Bild, die Schatten fallen nach rechts.

Bildpaar zum Themenbereich Spektrum

Die Bilder zum Themenbereich Spektrum demonstrieren beide das Farbspektrum einer Weißlichtquelle. Das AP zeigt einen in der Natur aufgenommenen Regenbogen. Im CEP ist außer dem Spektrum die Lichtquelle sowie das lichtbrechende Medium zu sehen.

Bei der Auswahl des APs für den Themenbereich Spektrum lag der Fokus auf der Abbildung der Symmetrie des Phänomens sowie der Anzahl an überflüssigen Objekten. Die Vielfalt an verfügbaren Regenbogenbildern verringert sich deutlich bei der Beschränkung auf Bilder, die einen vollständigen und zentrierten Regenbogen zeigen. Da Regenbogen nicht planbar entstehen, gibt es oft viele irrelevante Objekte in den Fotografien. Bilder ohne irrelevante Objekte wurden leider nicht gefunden. Schließlich fiel die Wahl auf ein Bild, welches irrelevante Objekte, ein See und eine kleine Wolke vor der Landschaft, zumindest symmetrisch abbildet. Da das Phänomen Regenbogen oft mit einem grauen Himmel einhergeht, ist hier nicht das gesamte Bild farbig. Bei diesem Phänomen kann die Lichtquelle nicht im selben Bild vorhanden sein, da ein Panoramafoto unter anderem die Vergleichbarkeit zu den anderen Bildern nicht gewährleisten kann.

Das CEP zeigt die Lichtquelle, ein Overheadprojektor, ein Wasserbad, an dem das Licht gebrochen wird sowie das resultierende Spektrum an einer Wand. Damit sind alle für die Entstehung eines Lichtspektrums relevanten Objekte im Bild. Der Overheadprojektor ist allerdings nicht mehr allen

Schülerinnen und Schülern bekannt, da in modernen Klassenzimmern Beamer und Dokumentenkameras die Overheadprojektoren meist ersetzen. Es sind keine zusätzlichen Objekte im Bild zu sehen.

Bildpaar zum Themenbereich Reflexion

Beide Bilder zum Themenbereich Reflexion zeigen als Objekte eine spiegelnde Fläche und Reflexionen der Objekte. Im AP wird eine Landschaft, bestehend aus Bäumen, Büschen und Berg, in einem Bergsee reflektiert. Im CEP ist das spiegelnde Element eine viereckige schwarze Fläche, das reflektierte Objekt ein Buchstabe aus Pappe. Hier hat das AP einen inhaltlichen Vorteil hinsichtlich der Gestaltgesetze: Der See ist leicht als See und damit spiegelnde Fläche erkennbar. Das CEP hat dagegen den Vorteil, dass nur ein Objekt reflektiert wird. Der Buchstabe ist nicht spiegelsymmetrisch, sodass das (nicht-) Vertauschen von links und rechts bei Spiegelungen untersucht werden kann. Diese Untersuchung gelingt im AP nur mit Einbeziehung mehrerer sich spiegelnder Objekte.

Bildpaar zum Themenbereich Brechung

Beide Bilder zum Themenbereich Brechung zeigen Hintergrundobjekte sowie das Abbild der Hintergrundobjekte durch eine runde Linse. Im AP ist diese Linse eine Glaskugel. Solche Glaskugeln sind über soziale Medien als künstlerische Elemente im Alltag von Schülerinnen und Schülern verankert. Im CEP wirkt ein mit Wasser gefüllter Rundkolben als Linse. Die Hintergrundobjekte im AP sind Himmel, Gras und Fels. Das Hintergrundobjekt im CEP ist der Buchstabe F. Der experimentelle Aufbau zur Veranschaulichung des Phänomens benötigt zusätzliche Objekte in beiden Bildern: Im AP wird die Kugellinse mit einer Hand gehalten, im CEP durch Stativmaterial. Diese Halterung nimmt im CEP mehr Platz ein als im AP. Somit sind in beiden Bildern für das Phänomen irrelevante Objekte visualisiert, die jedoch für das Bildverständnis relevant sind.

Tabelle 4.2: Übersicht über die Umsetzung der verschiedenen Kriterien und Inhalte in den acht Fotografien.

	AP	CEP
Lichtausbreitung		
Ästhetik	Dieses Bild ist besonders farbig.	Dieses Bild besteht vor allem aus Graustufen.
Inhalt	Dieses Bild zeigt die Sonne als Lichtquelle, Wolken als Hindernisse sowie deren Schatten in der dunstigen Atmosphäre.	Dieses Bild zeigt eine Lampe als Lichtquelle, Holzklötze als Hindernisse sowie deren Schatten auf weißem Hintergrund.
Sonstige Anforderungen	Das Bild wird von Bozkuş (2018) zur Verfügung gestellt. ^A	Das Bild wurde von der Autorin erstellt.

^A Bei der Fotografie zu dem Phänomen Lichtausbreitung handelt es sich um eine Nachstellung, die sehr ähnlich zu der in der Studie verwendeten Fotografie ist. Aufgrund von Bildrechten durfte das Bild in der Studie verwendet werden, nicht aber in einer Veröffentlichung.

Spektrum		
Ästhetik	Dieses Bild von einem echten Regenbogen hat eine mittlere Anzahl von Objekten.	Dieses Bild enthält farbige Bildelemente, was hier unvermeidlich ist.
Inhalt	Es ist leider nicht möglich, die Sonne als Lichtquelle, die Regenwolken und den Regenbogen beim Fotografieren gleichzeitig zu erfassen. ^B	Der Overheadprojektor als Lichtquelle, das Dispersionsmittel Wasser im Wasserbad sowie der künstliche Regenbogen sind sichtbar. Der Overheadprojektor ist nicht unbedingt allen Schülerinnen und Schülern bekannt.
Sonstige Anforderungen	Das Bild wird von Werner (2013) zur Verfügung gestellt.	Das Bild wurde von der Autorin erstellt.

^B Es wäre theoretisch möglich, ein Panoramafoto zu erstellen. Die Maße eines solchen Panoramafotos würden jedoch nicht vergleichbar mit den anderen Fotografien sein. Es würde auch praktisch mit seinen Ausmaßen nicht in die Lernumgebung passen.

Reflexion		
Ästhetik	Die Objekte sind klar voneinander unterscheidbar.	Die Objekte sind klar voneinander unterscheidbar. Dieses Bild besteht vor allem aus Graustufen.
Inhalt	Zu sehen sind alle relevanten Objekte: ein Berg, Bäume, Himmel sowie deren Spiegelungen in einem Bergsee. Damit kann oben, unten, rechts und links im Bild und Spiegelbild leicht verortet werden.	Abgebildet sind ein kleiner Spiegel, ein Buchstabe F aus Pappe und sein Spiegelbild. Der Buchstabe ist asymmetrisch, sodass oben, unten, rechts und links im Bild und Spiegelbild leicht verortet werden können.
Sonstige Anforderungen	Das Bild wird von Oregon's Mt. Hood Territory (2005) zur Verfügung gestellt.	Das Bild wurde von der Autorin erstellt.

Brechung		
Ästhetik	Der Kontrast zwischen Himmel und Landschaft ist deutlich. Allerdings gibt es einige irrelevante Objekte in der Landschaft.	Der Aufbau ist wichtig für das Verständnis des Bildes, aber für das physikalische Phänomen ist er irrelevant.
Inhalt	Dieses Bild zeigt das Abbild einer Landschaft durch eine Glaskugel.	Dieses Bild zeigt den Buchstaben F sowie sein Abbild durch einen Rundkolben.
Sonstige Anforderungen	Das Bild von Gou (2016) wird von der American Association of Physics Teacher zur Verfügung gestellt.	Das Bild wurde von der Autorin erstellt.

4.2 Studie mit Bildern in einer Lernumgebung im Unterricht

In diesem Kapitel werden zuerst das Studiendesign sowie der Ablauf einer Durchführung vorgestellt. Anschließend werden die erhobenen Variablen vorgestellt. Schließlich wird die Lernumgebung erläutert. Dabei wird auf Aspekte wie die Erstellung des Feedbacks und die technische Umsetzung eingegangen.

4.2.1 Beschreibung der Stichprobe der Schulstudie

Die Schulstudie wurde in vier gymnasialen Klassen und zwei Klassen einer Realschule durchgeführt, mit insgesamt 118 Schülerinnen und Schülern der Mittelstufe. Die Teilnehmenden stammten aus 7. Klassen der Realschule, Wahlpflichtfächergruppe I (naturwissenschaftlicher Zweig) sowie aus 8. Klassen von Gymnasien, in denen die geometrische Optik in den Fächern Natur und Technik (7. Klasse) und Physik (8. Klasse) unterrichtet wird. Von den Teilnehmenden waren 51 % weiblich ($N = 57$) und das durchschnittliche Alter betrug 13,4 Jahre ($SD = 0,7$).

4.2.2 Studiendesign der Schulstudie

Das Herzstück der Schulstudie ist die Intervention mit der Lernumgebung. Die Lernumgebung sowie die ästhetische und affektive Bildwahrnehmung sind in einem Crossover-Design konzipiert, sodass alle Probanden Aufgaben mit beiden Bildkategorien lösen. Abbildung 4.1 visualisiert das Crossover-Design grafisch; Abbildung 4.2 in einer informativen Kurzschreibweise nach Shadish et al. (2002). Die Einteilung in die Untersuchungsgruppen G1 und G2 erfolgt zufällig. Die beiden Untersuchungsgruppen beginnen mit unterschiedlichen Bildkategorien und nutzen anschließend abwechselnd APs und CEPs. Somit wird sichergestellt, dass für keine Probanden Vor- oder Nachteile durch die Nutzung von Bildern aus nur einer Bildkategorie entstehen. Des Weiteren wird mit dem Crossover-Design gewährleistet, dass Unterschiede zwischen den Gruppen herausfallen. Ein Nachteil des Crossover-Designs ist, dass carry-on Effekte auftreten können, also Probanden ihre Erfahrung mit einer Bildkategorie in das Bewerten oder Arbeiten der anderen Bildkategorie mitnehmen. Dieser Nachteil wird als geringer betrachtet als die Vorteile. Vor und nach dem Arbeiten in der Lernumgebung bearbeiten die Schülerinnen und Schüler einen Prä- bzw. Posttest. Beide Tests sind in DINA4 ausgedruckt, damit die Bilder bei der Bildbewertung möglichst groß sind. Die Intervention wird auf iPads präsentiert, damit eine Interaktivität der Lernumgebung realisiert werden kann.

Bildkategorie	Lichtausbreitung	Spektrum	Reflektion	Brechung
AP	G1		G1	
CEP		G1		G1

Abbildung 4.1: Grafische Veranschaulichung des Crossover-Designs. Die Probanden werden am Anfang randomisiert in die Untersuchungsgruppen G1 und G2 eingeteilt.

R O X₁Y₁ X₂Y₂ X₁Y₃ X₂Y₄ O
R O X₂Y₁ X₁Y₂ X₂Y₃ X₁Y₄ O

Abbildung 4.2: Informative Kurzschreibweise. Abkürzungen entsprechen: R: Zuweisung folgt dem Zufallsprinzip, O: Observation, bzw. Erhebung von Daten, X: unabhängige Variable, hier Bildkategorie; Indizes beziehen sich auf die Level AP bzw. CEP, Y: zweite unabhängige Variable, hier Themen; Indizes beziehen sich auf die konkreten Themenbereiche, dabei ist die Reihenfolge wie in der Grafik.

4.2.3 Ablauf des Unterrichts

Die Studie wurde jeweils im Rahmen einer Doppelstunde durchgeführt. Eine Visualisierung des Ablaufs dieser Doppelstunde zeigt Abbildung 4.3. Zu Anfang gab ein kurzes Eingangsvideo den Schülerinnen und Schülern einen Überblick über die Studie. Das darauffolgende Bearbeiten des Prätests bestehend aus dem Wissens- und Interessenstests dauerte etwa zehn Minuten. Nachfolgend bearbeiteten die Schülerinnen und Schüler Lernsequenzen in einer Lernumgebung auf iPads. Diese Intervention dauerte etwa eine halbe Stunde. Der abschließende Posttest mit dem Bewerten der Bilder, der Beurteilung des Arbeitens mit Bildern und dem Wissenstest erforderte insgesamt etwa eine Bearbeitungszeit von 15 Minuten. Bei der zweiten Bearbeitung des Wissenstests waren die Probanden schneller. In der Abbildung 4.3 nicht aufgeführt sind das Austeilen der Arbeitsmaterialien und ein kurzes Klassengespräch zu Anfang und Ende der Doppelstunde, das jeweils weniger als fünf Minuten in Anspruch nahm.

Zu bemerken ist, dass angesichts der kurzen Interventionszeit keine signifikanten Lerneffekte im Bereich des konzeptionellen Wissens zu erwarten sind. Die Lernaufgaben und die Fragebögen wurden in Einzelarbeit durchgeführt. Probanden der Untersuchungsgruppe G1 hatten jeweils Probanden der Untersuchungsgruppe G2 und vice versa als Sitznachbarn, sodass ein Abschaun bei Sitznachbarn entfiel. Die Lernaufgaben boten den Probanden jeweils Feedback zu ihrer Lösung. Nach Ansehen des Feedbacks mit einer Musterlösung konnten die Probanden ihre Lösung nicht mehr ändern.

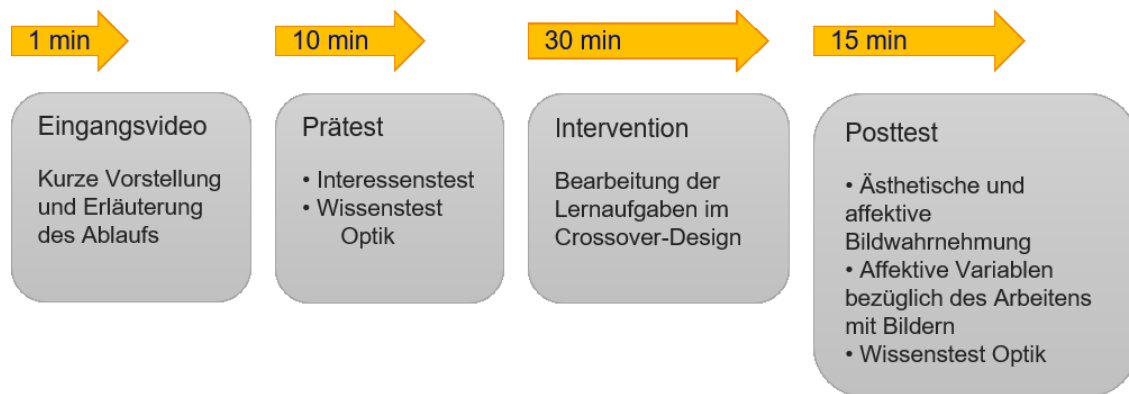


Abbildung 4.3: Zeitlicher Ablauf einer Durchführung. Nach dem Eingangsvideo auf dem iPad bearbeiten die Schülerinnen und Schüler den ausgedruckten Prätest. Anschließend befassen sie sich auf dem iPad mit der Intervention im Crossover-Design. Schließlich bearbeiten sie die verschiedenen Teile des ausgedruckten Posttests.

4.2.4 Variablenplan und Zusammenstellung der Messinstrumente

In folgendem Unterkapitel werden die verwendeten Variablen und Messinstrumente beschrieben. Zunächst werden die unabhängigen und abhängigen Variablen in Tabelle 4.3 sowie die Prädiktorvariablen in Tabelle 4.4 vorgestellt. Anschließend wird auf die einzelnen Instrumente eingegangen und die zugrunde liegende Literatur sowie Überlegungen zur Auswahl der einzelnen Items erläutert.

Tabelle 4.3: Variablenplan mit den unabhängigen und abhängigen Variablen sowie ihren Subskalen. Zusätzlich sind die Anzahl der jeweiligen Items und die Zeitpunkte ihrer Erhebung gezeigt.

Variablen	Detailangaben und Literaturhinweise	# Items	Zeitpunkte der Datenerhebung
<i>Unabhängige Variablen</i>			
1. Bildkategorie (AP oder CEP)	Ästhetische Bilder (AP) oder Bilder eines Experiments im Klassenzimmer (CEP); Probanden arbeiten im Wechsel mit beiden Kategorien je zweimal		
2. Physikalischer Themenbereich	Lichtausbreitung, Spektrum, Reflexion, Brechung; Probanden bearbeiten alle Themenbereiche in dieser Reihenfolge nacheinander.		
<i>Abhängige Variablen</i>			
3. Wissenstest Optik	Wissenstest Optik mit den folgenden Themenbereichen; (Hettmannsperger, Müller, Scheid, Kuhn, & Vogt, 2021), (Winkelmann, 2015): a. Lichtausbreitung b. Spektrum c. Reflexion d. Brechung	10 6 8 8	Prä- und Posttest
4. Subjektive visuelle Ästhetik bezüglich der einzelnen Bilder	Die Bewertung erfolgt in sechsstufigen Likertskalen mit folgenden Subskalen: a. Instrument zur ästhetischen Wahrnehmung von Bildern (laePP); (Miller, 2011), (Lavie & Tractinsky, 2004) b. Instrument zur affektiven Wahrnehmung von Bildern (lafPP); (Lenzner, Schnotz, & Müller, 2013), (Steyer, Schwenkmezger, Notz, & Eid, 1997)	6 5	Posttest

Tabelle 4.4: Variablenplan der Prädiktorvariablen sowie ihren Subskalen. Zusätzlich sind die Anzahl der jeweiligen Items und die Zeitpunkte ihrer Erhebung gezeigt.

Variablen	Detailangaben und Quellen	# Items	Zeitpunkte der Datenerhebung
<i>Prädiktorvariablen</i>			
5. Affektive Variablen bezüglich des Arbeitens mit Bildern ^c	Die Angaben erfolgen in sechsstufigen Likertskalen. Sie enthalten folgende Subskalen: a. Ästhetische Emotionen; (Schindler, et al., 2017) b. Epistemische Emotionen; (Schindler, et al., 2017) c. Negative Emotionen; (Schindler, et al., 2017) d. Neugierde; (Hirth, 2019) e. gefühlter Stress; (Miller, 2011) f. Intrinsische Motivation/Engagement; (Kuhn, 2010) g. Mentale Anstrengung; (Miller, 2011) In diesen Subskalen sind auch Angaben zum Cognitive Load nach Miller (2011) mit enthalten.	6 5 2 3 4 3 1	Posttest
6. Geschlecht			Prätest
7. Schulische Vertiefung	Abfrage ob naturwissenschaftlicher Zweig		Prätest
8. Interesse	Die Angaben erfolgen in sechsstufigen Likertskalen. Sie enthalten folgende Subskalen: a. Interesse an der Physik, I_Phy (Rakoczy, Buff, & Lipowsky, 2005) b. Interesse am Fotografieren, I_Photo (Rakoczy, Buff, & Lipowsky, 2005) c. Intrinsische Motivation/Engagement, IME (Kuhn, 2010)	7 3 4	Prätest
9. Lernaufgaben	Weitere Informationen aus den Lernaufgaben: a. Fachliche Bewertung der Lernaufgaben b. Bearbeitungszeit pro Aufgabe (nur bei ausgewählten Probanden aufgenommen)		Lernumgebung

^c Die affektiven Variablen bezüglich des Arbeitens mit Bildern werden im weiteren Verlauf nicht weiter ausgewertet, siehe Kapitel 5.4. Sie wurden jedoch erhoben und sind aus Gründen der Vollständigkeit hier aufgeführt.

Zusätzlich wurde am Ende des Posttests mit einem Freitextfeld gefragt, welches Bild den Probanden am besten gefallen hat. Ihre Wahl sollten die Schülerinnen und Schüler stichwortartig begründen. Dies ergänzt im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Analysen zur ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung.

4.2.5 Subjektive visuelle Ästhetik bezüglich der angebotenen Bilder

Zur Bearbeitung der Forschungsfrage 1 wird ein Test zur Messung der ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung durchgeführt. Nach dem Bearbeiten der Lernaufgaben erfolgt eine subjektive Bewertung der jeweils genutzten Bilder hinsichtlich der ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung (IaePP sowie IafPP; für „instrument for aesthetic picture perception“ sowie „instrument for affective picture perception“). Die Subskalen bestehen aus 6 bzw. 5 Items. Die Items der ästhetischen Bildwahrnehmung sind Teile des Instruments von Miller (2011), das wiederum auf dem umfassenden Analyseinstrument von Lavie und Tractinsky (2004) basiert. Miller nutzt zwei Subskalen, die klassische und die expressive Ästhetik. Seine Analysen unterstützen die Kombination dieser Subskalen als eine gemeinsame Skala. Für die vorliegende Arbeit wird daher die klassische und die expressive Ästhetik als eine zusammengesetzte Subskala für die ästhetischen Bildwahrnehmung eingesetzt. Die selektierte Auswahl der Items reduziert Millers Auswahl auf solche Items, die sich für die Bewertung von Fotografien eignen und vermeidet sprachliche Überschneidungen aufgrund der Übersetzung ins Deutsche. Schlussendlich werden bei der ästhetischen Bildwahrnehmung die Teilnehmer gebeten, ihre Wahrnehmung des Bildes mit den Begriffen „ästhetisch“, „ansprechend“, „erkennbar“, „kreativ“, „faszinierend“, „originell“ zu bewerten, siehe auch Tabelle 4.5.

Für die affektive Bildwahrnehmung wurden insgesamt fünf Items eingesetzt. Sie sind Teil des „Mehrdimensionalen Befindlichkeitsfragebogens“ von Steyer und ein Teil wurde bereits zur Erhebung der Stimmung bei dekorativen Bildern eingesetzt (Lenzner et al., 2013; Steyer et al., 1997). Mit dem „Mehrdimensionalen Befindlichkeitsfragebogen“ werden drei Dimensionen der Stimmung abgedeckt: Gute vs. schlechte Stimmung, Wachheit vs. Müdigkeit sowie Ruhe vs. Unruhe. Hier werden die drei Dimensionen mit insgesamt fünf Items abgedeckt. Zum einen mit den drei Items, die auch Lenzner in ihren Studien eingesetzt hat sowie mit zwei weiteren Items als Ergänzung zur Gesamtheit des Instruments. Die Teilnehmer beschreiben ihre affektive Wahrnehmung zu jedem Bild mit den Begriffen „glücklich“, „gelangweilt“, „gut“, „wach“ und „ruhig“ auf einer sechsstufigen Likertskala (siehe auch Tabelle 4.5).

Tabelle 4.5: Itemkürzel und Itemformulierungen zur ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung (laePP sowie lafPP).

Itemkürzel	Itemformulierung
laePP_1	Das Bild finde ich ästhetisch.
laePP_2	Das Bild finde ich ansprechend.
laePP_3	Im Bild ist alles gut erkennbar.
laePP_4	Das Bild finde ich kreativ.
laePP_5	Das Bild finde ich faszinierend.
laePP_6	Das Bild finde ich originell.
lafPP_1	Beim Betrachten des Bildes fühle ich mich glücklich.
lafPP_2	Beim Betrachten des Bildes fühle ich mich gelangweilt.
lafPP_3	Beim Betrachten des Bildes fühle ich mich gut.
lafPP_4	Beim Betrachten des Bildes fühle ich mich wach.
lafPP_5	Beim Betrachten des Bildes fühle ich mich ruhig.

4.2.6 Wissenstest Optik

Die Beantwortung der Forschungsfrage 3 erfordert einen Test zum Messen des Wissenstandes. Der Wissenstest Optik umfasst Fragen aus den vier Themenbereichen Lichtausbreitung, Spektrum, Reflexion und Brechung, siehe im Anhang in Kapitel A.2.6. Das Niveau der Fragen entspricht dem Level der 7. und 8. Klasse. Er kommt im Prätest sowie im Posttest zum Einsatz. Im Posttest wurde die Reihenfolge der Themen geändert, damit er weniger repetitiv wirkt. Als Vorlage diente der Konzepttest von Hettmannsperger et al. (2021). Für die vorliegende Studie wurden die Fragen in ein Richtig/Falsch-Format umgewandelt. Zum Themenbereich Brechung wurden zwei Fragen aus dem Test von Winkelmann aus Studie 1, Frage 1 und Frage 15, eingefügt (Winkelmann, 2015) und gleichzeitig bei diesem Themenbereich der Test von Hettmannsperger verkürzt. Damit deckt der Wissenstest die Themen der Lernumgebung inhaltlich enger ab. Insgesamt besteht der Wissenstest aus 32 Fragen. Auf die Bereiche Lichtausbreitung, Spektrum, Reflexion und Brechung entfallen dabei jeweils 10, 6, 8 sowie 8 Fragen.

4.2.7 Interesse und Motivation der Probanden

Das Interesse an der Physik, am Fotografieren und die intrinsische Motivation/Engagement kann das Bearbeiten der Lernaufgaben und die Faszination an den Bildern beeinflussen. Daher wird es als Prädiktorvariable aufgenommen. Das Interesse und die Motivation sind aufgeteilt in Interesse an

der Physik (I_Phy), angelehnt an Rakoczy et al. (2005), Interesse am Fotografieren (I_Ph0), angelehnt an die Skala I_Phy, und intrinsische Motivation/Engagement (IME), angelehnt an Kuhn (2010). Die Items können Werte von 1 „stimme gar nicht zu“ bis 6 „stimme vollständig zu“ annehmen. Die Subskalen sind in Tabelle 4.6 präsentiert.

Tabelle 4.6: Itemkürzel und Itemformulierungen zum Interesse an der Physik, am Fotografieren und zur intrinsischen Motivation/Engagement.

Itemkürzel	Itemformulierung
I_Phy_1	Physik ist spannend.
I_Phy_2	Freiwillig würde ich mich nicht mit Physik beschäftigen.
I_Phy_3	Physik ist mir persönlich wichtig.
I_Phy_4	Physik macht mir keinen Spaß.
I_Phy_5	Physik ist nützlich für mich.
I_Phy_6	Physik ist mir gleichgültig.
I_Phy_7	Physik ist langweilig.
I_Ph0_1	Fotografieren ist spannend.
I_Ph0_2	Freiwillig würde ich mich nicht mit Fotografieren beschäftigen.
I_Ph0_3	Fotografieren ist mir persönlich wichtig.
IME_1	Ich schaue zu Hause z. B. in Büchern oder im Internet nach, um mehr zu physikalischen Themen zu erfahren.
IME_2	Ich strenge mich in Physik mehr an als in anderen Fächern.
IME_3	Ein Problem in Physik zu lösen, macht mir Spaß.
IME_4	Wenn ich mich mit physikalischen Themen befasse, merke ich nicht, wie die Zeit vergeht.

4.2.8 Implementierung der Bilder in der interaktiven Lernumgebung

Die Implementierung von Bildern in die interaktive Lernumgebung erfordert eine sorgfältige Planung und Ausführung, um sicherzustellen, dass die Lernziele erreicht werden. Dieses Unterkapitel beschreibt die didaktischen Entscheidungen und technische Schritte, die für die erfolgreiche Integration von Fotografien notwendig sind. Dabei wird für die Beantwortung der Forschungsfrage 4 die Bearbeitungszeit pro Aufgabe mit protokolliert.

Didaktische Anforderungen an die Lernumgebung

Die verwendeten Bilder sollen zum Nachdenken anregen und physikalische Betrachtungsweisen festigen und vertiefen. Darüber hinaus sollen sie auch einen Transfer von Wissen

aus dem Unterricht in den Alltag außerhalb des Klassenzimmers anregen. Eine aktive Auseinandersetzung mit dem Bild und dem gezeigten Phänomen soll sichergestellt werden. Insgesamt soll damit das Bild instruktional eingebunden sein.

Dafür werden zu den Bildern konkrete Lernaufgaben gestellt. Die Bilder mit den Lernaufgaben werden in einer Lernumgebung aufbereitet. Die Lernumgebung ist mithilfe der Software „HTML5 Paket“ (H5P), einer standardmäßigen Applikation zur Erstellung interaktiver Lerninhalte, umgesetzt. Auf der Benutzeroberfläche können verschiedene Formate, wie interaktive Präsentationen, Quizze, Karteikarten, Mind-Maps oder Kolumnen mit Aufgabenformaten wie Einfachauswahlfrage, Mehrfachauswahlfrage und offene Frage erstellt werden. Bei Kolumnen lässt sich eine aktive Auseinandersetzung mit Bildern und unterschiedlichen Aufgabenformaten umsetzen. Daher wird eine Kolumne mit Einfach- und Mehrfachauswahlfragen, offene Fragen, „Drag und Drop“ und Lückentexten sowie kurzen Informationstexten und natürlich den Bildern erstellt.

Für die Studie erfolgt die Auseinandersetzung mit dem Bild in Einzelarbeit. Prinzipiell ist hier die sozialere Arbeitsform Partnerarbeit ebenfalls möglich. Für eine Studie zur Untersuchung der Wahrnehmung von Bildern gibt es allerdings nur Sinn, die Probanden isoliert zu betrachten, da ästhetisches Empfinden sowie Emotionen individuell erfasst werden sollen.

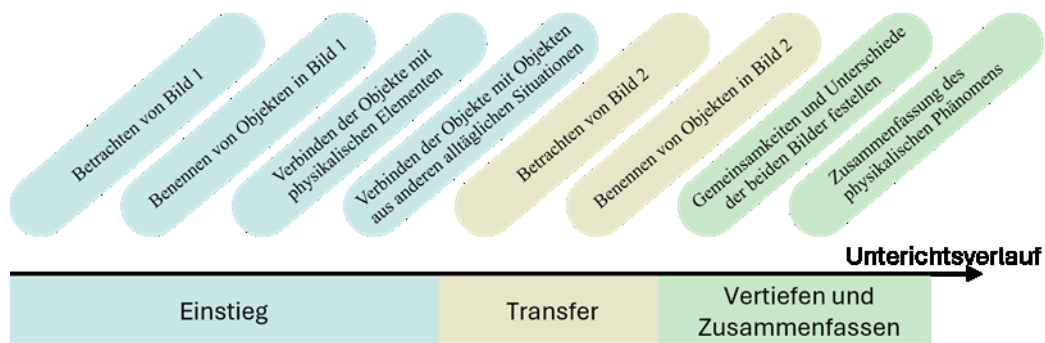


Abbildung 4.4: Generelle Abfolge der Lernaufgaben für einen Themenbereich.

Bei allen Themenbereichen ist das Grundgerüst für die Lernaufgaben gleich: Fokussieren auf relevante Bildelemente, Verbinden der Bildelemente mit dem physikalischen Phänomen, Erkennen des physikalischen Phänomens in einem weiteren Bild, Zusammenfassen des physikalischen Phänomens. Abbildung 4.4 gibt einen Überblick über den generellen Ablauf eines Themenbereichs. Abbildung 4.5 stellt zwei repräsentative Lernaufgaben vor. Bei allen vier Themenbereichen wird zunächst das erste Bild gezeigt. Die erste Arbeitsauftrag ist, das Bild genau zu betrachten. Dazu wird nach Objekten gefragt, die auf dem Bild sichtbar sind. Zum Beispiel wird beim Themenbereich Lichtausbreitung nach der Lichtquelle gefragt, während beim Themenbereich Reflexion spezifisch nach Objekten in bestimmten Bildbereichen gefragt wird. So wird sichergestellt, dass Probanden sich aktiv mit dem Bild auseinandersetzen. Die Verbindung von Elementen im Bild mit dem physikalischen Phänomen wird in

den verschiedenen Themenbereichen mit unterschiedlichen Aufgabenformaten, z. B. „Drag and Drop“ umgesetzt. So wird sichergestellt, dass das Aufgabenformat nicht monoton wirkt. Zum Beispiel befassen sich die Probanden beim Themenbereich Lichtausbreitung mit einer Schemazeichnung, die den gleichen Sachverhalt wie die Fotografie zeigt. Hier wird nach der Vervollständigung der Zeichnung gefragt. Als nächstes wird der gleiche Sachverhalt in einer weiteren Fotografie derselben Bildkategorie, jedoch in einer anderen Szene, dargestellt. Auch in diesem Bild wird zunächst nach den Objekten und ihrer Funktion gefragt, um die Verarbeitungstiefe zu sichern. Danach wird nach Gemeinsamkeiten und Unterschieden zum ersten Bild bezüglich des physikalischen Phänomens gesucht. Abschließend wird in einem Lückentext der behandelte Sachverhalt zusammengefasst. Die einzige Ausnahme bildet der Lernbereich Regenbogen. Hier wurden keine zweiten Fotografien gefunden, die genügend Unterschiede zu den ersten Fotografien haben. Stattdessen wird hier auf die eigenen Erfahrungen der Probanden zu Regenbogen eingegangen.



Als nächstes beschäftigst du dich mit Fotos zu Sammellinsen.

1. Betrachte das Foto.
Nenne das optische Element und ein abgebildetes Objekt, das du in diesem Foto siehst!

3. Im Unterricht kann man das Experiment auf den Fotos nachstellen. Erinnere dich an folgenden Versuch: Mit einer Sammellinse wird eine beleuchtete Eins auf einem Schirm abgebildet. Vergleiche nun den Versuch im Unterricht mit dem Ereignis auf den Fotos, indem du die folgende Tabelle vervollständigst.

Ziehe dazu die Textfelder in die Tabelle!

Objekt im Versuch im Physikunterricht	Entsprechendes Objekt im Foto 1	Entsprechendes Objekt im Foto 2
Beleuchtete Eins	Büsche ✓	Blume ✓
Sammellinse	Glaskugel ✓	Tropfen ✓
Schirm	Kamera ✓	Kamera ✓

Super!

6/6

Betrachten von Bild 1

Benennen von Objekten in Bild 1

Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Bilder feststellen

Abbildung 4.5: Beispiele für Aufgaben aus der Lernumgebung. Hier sind eine Eingangsaufgabe und eine Vertiefungsaufgabe dargestellt. Bei der zweiten Aufgabe ist das Feedback zu sehen. Bild oben und unten links: Yue Gou, zur Verfügung gestellt von der American Association of Physics Teachers. Bild unten rechts: Mila Zinkova, mit Genehmigung verwendet.

Implementierung des Feedbacks

In H5P wird Feedback manuell implementiert. Bei geschlossenen Aufgabenformaten wie „Drag and Drop“ sowie Einfach- und Mehrfachauswahlfragen wird rückgemeldet, welche Antwortteile falsch bzw. richtig sind. Zusätzlich wird bei einem bestimmten Anteil an richtigen Zuordnungen bzw. richtig ausgewählten Antworten dieser Anteil und eine motivierende Rückmeldung gegeben. Bei offenen Antworten, die einen längeren Antworttext erfordern, wurden im Vorfeld verschiedene Stichwörter als richtig gespeichert. Nach der Eingabe einer Antwort und Klicken auf „Überprüfen“ bekommt der Lernende bei fehlenden Stichwörtern eine Antwort, welche Stichwörter zur richtigen Lösung geführt hätten. Zusätzlich wurde eine spezifischere Rückmeldung mit einem Hinweis, was der Fehler gewesen sein könnte zu potenziell häufigen, falschen, Antwort-Stichwörtern implementiert. Bei richtigen Stichwörtern erscheint ein Lob wie „sehr gut“ oder „gut gemacht“. Diese Antworten sind ebenfalls manuell eingestellt.

Zusammenstellung im H5P-Format

Zunächst wurde in einem Kurs in Moodle sowie mit der Software Lumi zu jedem Themenbereich ein H5P-Dokument mit den APs erstellt. Diese Dokumente enthalten Bilder, Lernaufgaben sowie Feedback. Anschließend wurden in Kopien davon die Dokumente für die CEPs angepasst. Die Lernaufgaben für die beiden Bildkategorien sind damit so ähnlich wie möglich, um die Antworten besser vergleichen zu können. Änderungen wurden lediglich bei Lernaufgaben vorgenommen, die sich direkt auf kontextbezogene Inhalte beziehen. Für das Crossover-Design wurden schließlich die einzelnen, themenbezogenen H5P-Dokumente mit jeweils abwechselnden Bildkategorien zu zwei separaten Seiten für jeweils Untersuchungsgruppe 1 und 2 zusammengefügt.

Technischer Teil der Umsetzung

Bei dem Einsatz in einer Schulklasse werden das Eingangsvideo sowie die Lernumgebung über ein iPad gestartet und bedient. Dazu wird vorher beides auf einen lokalen Server gelegt. Als Server kommt ein mobiler Laptop zum Einsatz. An den Server ist eine Fritz!Box angeschlossen, die ein lokales Netzwerk aufspannt. Die iPads wurden mit diesem lokalen WLAN verbunden.

Für die Messung Bearbeitungszeit einer Teilaufgabe wurde den HTML-Dateien zusätzlich ein Zeitstempel integriert. Dazu wurde der Quellcode der interaktiven Lernaufgaben so programmiert, dass jeweils der Klick auf „Überprüfen“ einen Eintrag in eine Logdatei erzeugt. Die Einträge beinhalten neben dem Zeitpunkt des Klicks auch die IP-Adresse des iPads und die Aufgabennummer. Mit Hilfe der Logdatei lässt sich somit für jeden Probanden der Zeitpunkt des Beendens jeder Teilaufgabe bestimmen. Aus der zeitlichen Differenz zum Zeitpunkts des Beendens der vorigen Teilaufgabe kann so eine obere Zeitspanne für die benötigte Zeit für die Bearbeitung einer Teilaufgabe errechnet

werden. Dadurch lassen sich für jeden Probanden individuell Rückschlüsse auf die benötigte Zeit für jede Teilaufgabe schließen.

Der Server wird mit der Applikation xampp verwaltet. Im Ordner „htdocs/arbm Bildern“ liegen die HTML bzw. H5P-Dokumente sowie die (identischen) Eingangsvideos „videot1.html“ und „videot2.html“. Im Ordner „xampp/apache/logs“ liegt die Datei „localhost-access.log“ zum Speichern der Zeitstempel.

Vorbereiten der iPads

Zunächst wird auf den iPads mit ungerader Nummer mit dem Browser Safari die Datei 192.168.188.31/videot1.html geöffnet. Damit arbeitet die Untersuchungsgruppe G1. Dementsprechend wird auf den iPads mit gerader Nummer im Browser die Datei 192.168.188.31/videot2.html für die Untersuchungsgruppe G2 geöffnet. Somit wird sichergestellt, dass jeweils die Hälfte der Probanden mit den APs beginnt und die andere Hälfte mit den CEPs. Über AirDrop können die Seiten videot1 bzw. video2 mit den weiteren iPads geteilt werden. Das geht wesentlich schneller, als die Seite bei jedem iPad manuell einzugeben und aufzurufen. Die Dokumentation der Nummern der eingerichteten iPads erfolgt in einer ausgedruckten Liste. In dieser Liste wird der Status bis zum Auslesen der Daten dokumentiert.

Darüber hinaus wurden vor der Untersuchung alle iPads manuell auf ihre WLAN Konnektivität überprüft, damit die H5P-Dateien nach dem Eingangsvideo geladen werden können und der Zeitstempel funktioniert. Dies war leider notwendig, da sich die iPads automatisch mit einem anderen WLAN verbinden, falls die Fritz!Box und damit das WLAN ausgeschaltet wird.

Sicherung der Daten der Lernumgebung

Vor dem Durchlaufen der Tests und der Lernumgebung wird das Eingangsvideo abgespielt. Daraufhin beginnen die Probanden den Prätest und anschließend die Lernumgebung zu bearbeiten. Die Klicks der Probanden auf „Überprüfen“ in der Lernumgebung werden mit ihrem Zeitstempel gespeichert. Nach Durchlauf der Studie der Probanden wird aus dem ausgefüllten H5P-Dokument ein PDF-Dokument erstellt. Das geht am zuverlässigsten mit der Applikation Apple Books. Das mit Apple Books erstellte PDF-Dokument kann über AirDrop an ein ausgewähltes iPad gesendet werden. Auf diesem ausgewählten iPad werden alle PDF-Dokumente in die Applikation Notability eingepflegt. In Notability werden die Lösungen der Lernaufgaben per Hand von Personen bewertet. Für die Gewährleistung einer reliablen und objektiven Bewertung wird die Interraterreliabilität berechnet, siehe Kapitel 5.5.

4.3 Interviewstudie

Nach dem Bearbeiten der Lernaufgaben wurden die einzelnen Bilder subjektiv von den Schülerinnen und Schülern hinsichtlich der ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung (IaePP und IafPP) bewertet (siehe Kapitel 4.2.5). Die Bewertung bezüglich der einzelnen Bilder hat in der Auswertung deutliche Unterschiede zwischen APs und CEPs aufgezeigt (siehe Kapitel 6.1). Für die Beantwortung der Forschungsfrage 2 wurden die Erkenntnisse zur ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung bezüglich der angebotenen Bilder durch Interviews ergänzt. Mithilfe der Interviewstudie wird untersucht, anhand von welchen Kriterien und Aspekten APs und CEPs bezüglich der Items in IaePP und IafPP unterschiedlich bewertet wurden. Die Antworten werden mit den Kriterien aus Tabelle 4.1 verglichen. Zusätzlich hilft die Interviewstudie das Verständnis der jeweiligen Items der Instrumente zur ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung im Detail zu vertiefen. Damit soll die Interpretation der Antworten zu den einzelnen Bildern mit einer nachgestellten Klärung gesichert werden. Außerdem soll untersucht werden, ob die ästhetischen und inhaltsbezogenen Kriterien wahrgenommen werden. Zur Untersuchung dieser drei Aspekte wurden zunächst Leitfragen formuliert, aus denen anschließend ein Interviewleitfaden und der Ablauf der Interviews entwickelt wurden. Im Unterkapitel 4.3.1 wird die Zusammenstellung des Interviewleitfadens vorgestellt. In Unterkapitel 4.3.2 wird ein kurzer Überblick über die Durchführung gegeben.

4.3.1 Zusammensetzung des Interviewleitfadens

Als erstes wurden die folgenden Leitfragen für das Interview formuliert:

- Welches Bild gefällt dir am besten?
- Was gefällt dir/gefällt dir nicht an dem Bild?
- Welche physikalischen Phänomene erkennst du im Bild?
- Manche Schülerinnen und Schüler finden, dass das Betrachten des Bildes beruhigend ist/gelangweilt macht/glücklich macht/einen in gute Stimmung setzt/aufweckt. Wie empfindest du das bei dem Bild? Wie begründest du das?
- Im Mittel haben viele Schülerinnen und Schüler das AP faszinierender/ästhetischer/kreativer/origineller bewertet als das Bild im Kontext Klassenzimmer. Kannst du das nachvollziehen? An welchen Eigenschaften der Bilder begründest du deine Entscheidung?
- In welchem alltäglichen Kontext ist das Phänomen Lichtausbreitung/Reflexion/Brechung zu finden?

Aus diesen Leitfragen wurden Aufforderungen und konkrete Fragen in einen Leitfaden abgeleitet. Der genaue Ablauf und die Ausformulierungen der Fragen sind im Anhang (siehe Kapitel A.4) zu finden. Im Folgenden wird ein Überblick über den Ablauf der Interviews gegeben.

Zunächst werden acht ausgedruckte Bilder im DIN A4 Format zeitgleich präsentiert. Diese Bilder sind die gleichen acht Bilder, welche in der Schulstudie bewertet wurden: Jeweils ein AP und ein CEP zu den Themenbereichen Lichtausbreitung, Spektrum, Reflexion sowie Brechung. Daraufhin werden die Probanden aufgefordert, sich das jeweils „beste“ Bild auszusuchen und die Auswahl zu begründen. Dabei wird ihnen genug Zeit gelassen, alle Bilder im Detail zu betrachten und auf sich einwirken zu lassen. Für die weiteren Fragen werden die Bilder vom Interviewer regelmäßig gewechselt. Dabei wird bei der Bildauswahl beachtet, dass die Hälfte der Schülerinnen und Schüler sich vor dem Interview mit dem Themenbereich Lichtbrechung an Sammellinsen ausführlich beschäftigt hatten.

Zu dem selbst ausgewählten Bild bekommen die Probanden als nächstes die beiden Fragen nach dem Gefallen bzw. nicht-Gefallen am Bild. Zum nicht-Gefallen wird das entsprechende zweite Bild (CEP oder AP) gezeigt. Als nächstes werden Fragen zu den Bildaspekten gestellt. Hierbei wird auf die einzelnen Items der laePP und lafPP eingegangen. Danach wird explizit die Wahrnehmung zu den in der Tabelle 4.1 vorgestellten Kriterien beleuchtet. Für die letzte Frage wurden die Bilder umgedreht und somit verdeckt, und es wurde nach der Erinnerung an physikalische Phänomene im Alltag gefragt. Damit wird auf die Aktualisierungsstärke und die Kontextanbindung abgezielt.

4.3.2 Durchführung der Interviews

An dem Interview haben insgesamt 18 Probanden teilgenommen. Für qualitative Einblicke ist diese Anzahl ausreichend. Die Probanden waren wie in der Schulstudie Schülerinnen und Schüler der 7. und 8. Klasse. Sie besuchten als Klassengemeinschaft den Lehrstuhl oder waren Nachhilfeschülerinnen und Schüler einer Studentin und hatten somit nicht an der Schulstudie teilgenommen. Probanden nahmen freiwillig an der Studie teil.

Alle Interviews wurden persönlich durchgeführt und dauerten etwa zehn Minuten. Es waren großzügige Tische bereitgestellt, auf denen alle Bilder ausgedruckt in DIN A4 gleichzeitig ausgebreitet werden konnten. Probanden wurde genug Ruhe und Zeit zur Verfügung gestellt, alle Bilder zu betrachten. Während der Interviews wurden die Auswahl der Bilder sowie Stichpunkte zu den Antworten vom Leiter des Interviews notiert. Dafür wurden jeweils Antwortbögen vorbereitet. Die Antwortbögen beinhalten die vorgedruckten Fragen, Platz für die Antwortskizzen sowie Platz für weitere Kommentare und zusätzliche, sich aus dem Gespräch ergebende Fragen. Den Bildern wurden Nummern von 1a bis 4b zugeordnet, um ein schnelles Notieren zu gewährleisten. Dabei steht die Zahl für die Themen Lichtausbreitung (1a und 1b), Spektrum (2a und 2b), Reflexion (3a und 3b) sowie Brechung (4a und 4b). Der Buchstabe *a* bezeichnet die APs und *b* die CEPs.

Im Anhang sind ab Tabelle A.9 die Antwortbögen der Probanden (I_SF_1 bis I_SF_8, Interview von Schülerinnen am Lehrstuhl) sowie von den Probanden 9 - 18 von den Nachhilfeschülerinnen und Schülern der Studentin (I_LB_1 bis I_LB_10) angehängt. Die Antworten wurden zusammengefasst und kategorisiert. In den Wortwolken in Kapitel 6.2 sind die Antworten der Probanden zusammengefasst und visualisiert.

5 Aufbereitung der Daten und deskriptive Statistiken

In der folgenden Datenaufbereitung werden die erhobenen Daten der Schulstudie vorgestellt. In Kapitel 5.1 werden zunächst die Aufbereitung der Daten der Schulstudie sowie die Itemanalysen von laePP und lafPP präsentiert. Weiterhin werden Antworten des Wissenstests Optik in Kapitel 5.2 sowie zu den Skalen des Interesses in Kapitel 5.3 aufbereitet und in einer deskriptiven Statistik vorgestellt. Nachfolgend werden die affektiven Variablen bezüglich des Arbeitens mit Bildern in Kapitel 5.4 kommentiert. Schließlich wird in Kapitel 5.5 die Vorgehensweise mit den Antworten aus der Lernumgebung beschrieben.

Die Schulstudie wurde in vier gymnasialen Klassen und zwei Klassen der Realschule durchgeführt. Bei der initialen Datenaufbereitung werden extreme Antworten, unvollständige Antworten ab mehr als drei hintereinander nicht ausgefüllten Items sowie Antworten mit Mustern wie einem Zickzack entfernt. Dadurch reduziert sich die Anzahl an vollständigen Antworten von 119 auf 115 für die ästhetische und affektive Bildwahrnehmung. Es ergeben sich 111 vollständige Datensets, welche neben der Bildwahrnehmung auch Antworten im Wissenstest Optik und Variablen zum Interesse beinhalten. Davon waren 56 Probanden in der Untersuchungsgruppe G1, welche zuerst mit APs gearbeitet haben und 55 in der Untersuchungsgruppe G2, welche zuerst mit CEPs gearbeitet haben.

5.1 Itemanalyse der Skala zur wahrgenommenen visuellen Ästhetik

Der Einsatz von neu zusammengestellten Instrumenten erfordert eine Itemanalyse (Field et al., 2012; Kline, 2005). Eine Itemanalyse charakterisiert eine Skala und ermöglicht eine Einordnung ihrer Items (Molz, 2016). Die Bildung einer psychometrisch guten Skala ist wichtig, da aus ihr die Ausprägung der Untersuchungsvariablen bestimmt werden. Bei der vorliegenden Arbeit bilden die Skalenmittelwerte die Grundlagen für die späteren Analysen, daher müssen die Skalen zuverlässig sein. Mithilfe einer Itemanalyse wird unter anderem sichergestellt, dass die gebildeten Instrumente reliabel sind (Field et al., 2012). Dazu werden zuerst die Item-Mittelwerte für laePP und lafPP und die Standardabweichungen der einzelnen Items berechnet (Kline, 2005). Weiterhin wird die interne Konsistenz untersucht, indem die Korrelation der Items zu ihrer jeweiligen Subskala und die Reliabilität der Subskala ohne das jeweilige Item bestimmt wird (Schmitt, 1996). Darüber kann entschieden werden, ob einzelne Items aus der weiteren Analyse ausgeschlossen werden (Kline, 2005). Außerdem wird geprüft, ob die Skalenmittelwerte der Probanden jeweils normalverteilt sind, da dies Voraussetzung für einige gängige Analysen wie ANOVA ist (Field et al., 2012). Schließlich wird die Struktur der Skala für wahrgenommene visuelle Ästhetik untersucht. Dazu wird eine explorative Faktorenanalyse durchgeführt (Brandt, 2020; Field et al., 2012). Die Itemanalyse wird für die in dieser

Arbeit neu zusammengestellten Instrumente zur Messung der wahrgenommenen visuellen Ästhetik, laePP und lafPP, getrennt und auf jedes Bild separat ausgeführt.

Bei der Aufbereitung der Daten wurde das Item lafPP_2 umgepolt, um eine konsistente Ausprägung der Skala zu gewährleisten. Damit entsprechen hohe Werte bei allen Items einer positiven Wahrnehmung und niedrige Werte einer negativen Wahrnehmung. Für den Themenbereich Lichtausbreitung zeigt Abbildung 5.1 exemplarisch die Item-Mittelwerte sowie den Standardfehler der jeweiligen Items. Die Histogramme der Items für die anderen drei Themenbereich sind im Anhang in Kapitel A.2.1 dargestellt. In allen Histogrammen weisen die Items bei laePP als auch bei lafPP höhere Item-Mittelwerte bei dem AP im Vergleich zu dem CEP auf. Die Item-Mittelwerte der CEPs liegen insbesondere außerhalb der Standardfehler der APs. Eine Ausnahme bildet lediglich das Item laePP_3 zur Klarheit bei den Bildpaaren zu den Themenbereichen Lichtausbreitung, Reflexion und Brechung. Daher ist es rechts der übrigen laePP Items angeordnet. Im Folgenden wird das Item laePP_3 näher diskutiert.

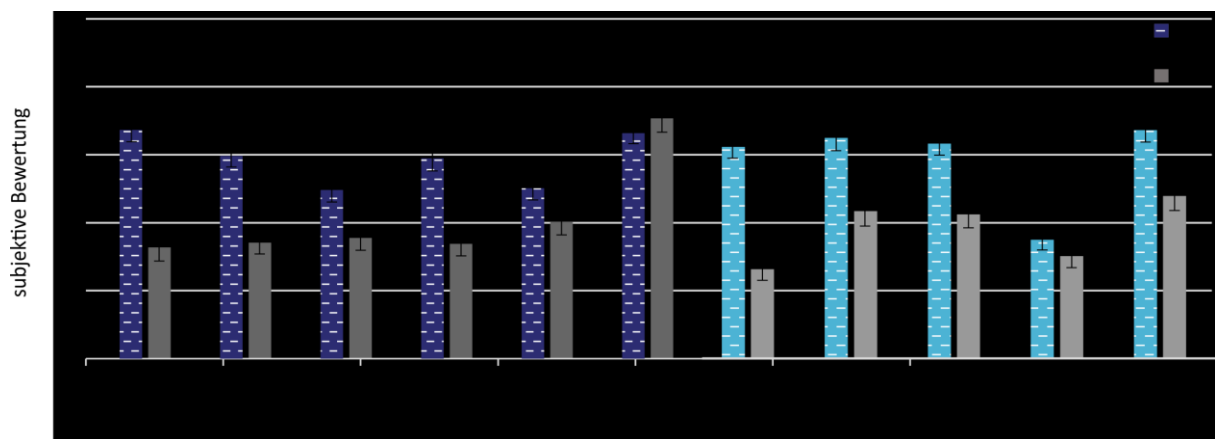


Abbildung 5.1: Subjektive Bewertung der wahrgenommenen visuellen Ästhetik für den Themenbereich Lichtausbreitung. Rechts sind in dunklen Farben die Item-Mittelwerte der Items von laePP angeordnet, links in hellen Farben von lafPP. Die Bewertungen der APs sind in Blau mit gestricheltem Muster; die der CEPs in Grau und einfarbig. Die Fehlerbalken zeigen Standardfehler.

Ausschluss des Items laePP_3

Die Histogramme legen nahe, dass das Item zur Klarheit des Bildes laePP_3 keine Informationen zu der visuellen Bildwahrnehmung beiträgt, da die Item-Mittelwerte der CEPs innerhalb der Standardfehler der Item-Mittelwerte der APs liegen. Für eine detaillierte Analyse des Items wurde zusätzlich die Korrelation von laePP_3 zu den anderen Items berechnet, siehe im Anhang in Kapitel A.2.1. Hier weist Item laePP_3 bei den Bildern keine oder eine sehr niedrige Korrelationen zu den anderen Items auf: die korrigierte Trennschärfe liegt bei sechs von acht Bildern unter 0,3, bei zweien

unter 0,5^D. Insofern stellt das Item laePP_3 hier einen klaren Sonderfall dar. Ein Grund für das uneindeutige Antwortverhalten bei laePP_3 könnte sein, dass die Interpretation des Begriffes „Klarheit“ nicht eindeutig ist: Eine ästhetische Klarheit im Sinne der Gestaltprinzipien ist nicht das gleiche wie eine kognitive Klarheit bezüglich des Inhalts und damit dem zugrundeliegenden physikalischen Phänomen. Jedoch ist bei der Itemformulierung nicht spezifiziert, ob Formen und Linien oder das physikalische Phänomen auf die Klarheit hin bewertet werden sollen. Zusätzlich ist zu bemerken, dass beim Erstellen der CEPs auf ästhetische Klarheit geachtet wurde. Für eine Studie wäre es nicht angemessen, unklare Bilder zu zeigen. Die weitere Itemanalyse wird ohne Item laePP_3 fortgesetzt.

Weitere Itemanalyse

Für die folgende Itemanalyse wurden zusätzlich zu den Item-Mittelwerten mit zugehörigen Standardabweichungen die Korrelationen zu den anderen Items der jeweiligen Subskala r_{it} sowie die Reliabilität α_c der Skala nach Cronbach ohne das jeweilige Item berechnet. Die Ergebnisse sind exemplarisch für den Themenbereich Lichtausbreitung in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Weitere Daten sind im Anhang in Kapitel A.2.1 gezeigt. Die Itemformulierungen in der Tabelle und in den Grafiken sind zur besseren Übersicht in einer Kurzformulierung des ursprünglichen Wortlauts dargestellt. Die ausführlichen Itemformulierungen sind in Tabelle 4.5 dokumentiert. Die Korrelationen r_{it} zu den anderen Items sollten einen größeren Wert als 0,3 zeigen, andernfalls sollte ein Ausschluss des Items in Erwägung gezogen werden (Field et al., 2012). Im Themenbereich Lichtausbreitung weisen zwei Items Korrelationen unter 0,3 auf: lafPP_2 sowie lafPP_4, jeweils beim AP. lafPP_2 zeigt jedoch bei der Mehrheit der Bilder (fünf von acht) eine Korrelation r_{it} deutlich größer als 0,3. lafPP5 weist nur beim AP zum Themenbereich Lichtausbreitung eine Korrelation kleiner als 0,3 auf und hat damit nur eine einzelne Ausnahme. Daher sind beide Items für die weitere Analyse geeignet und werden nicht ausgeschlossen.

^D Die Korrelationen zu den anderen Items sollten größere Werte als 0,3 zeigen, ansonsten sollte ein Ausschluss des Items in Betracht gezogen werden (Field et al., 2012).

Tabelle 5.1: Itemanalyse von laePP und lafPP mit Item-Mittelwert und Standardabweichung, Korrelation des Items zu den anderen Items sowie Reliabilität ohne das jeweilige Item für den Themenbereich Lichtausbreitung. $N_{CEP} = 58$; $N_{AP} = 60$. Die Bewertung erfolgte mit einer sechsstufigen Likertskala.

Item	Kurzform des Item Wortlauts	Gruppe	M	SD	r_{it}	α_c
laePP_1	Bild ist ästhetisch	AP	4,4	1,4	0,48	0,85
		CEP	2,6	1,4	0,58	0,87
laePP_2	Bild ist ansprechend	AP	4,0	1,4	0,65	0,81
		CEP	2,7	1,4	0,77	0,80
laePP_3	Bild ist klar	AP	4,3	1,2	kA^E	kA^E
		CEP	4,5	1,6	kA^E	kA^E
laePP_4	Bild ist kreativ	AP	3,5	1,4	0,73	0,79
		CEP	2,8	1,3	0,75	0,80
laePP_5	Bild ist faszinierend	AP	4,0	1,3	0,71	0,79
		CEP	2,7	1,4	0,68	0,82
laePP_6	Bild ist originell	AP	3,6	1,3	0,54	0,81
		CEP	3,0	1,5	0,59	0,85
lafPP_1	Fühle mich glücklich	AP	4,1	1,2	0,65	0,41
		CEP	2,3	1,2	0,75	0,80
lafPP_2	Fühle mich schläfrig	AP	4,3	1,5	0,03	0,75
		CEP	3,2	1,5	0,53	0,85
lafPP_3	Fühle mich gut	AP	4,2	1,3	0,52	0,50
		CEP	3,1	1,4	0,77	0,79
lafPP_4	Fühle mich wach	AP	2,8	1,2	0,19	0,65
		CEP	2,6	1,2	0,58	0,84
lafPP_5	Fühle mich ruhig	AP	4,4	1,4	0,63	0,43
		CEP	3,4	1,6	0,68	0,82

^E Das Item laePP_3 wird nicht in die weiteren Berechnungen der Item Korrelationen und der Reliabilität einbezogen.

Für die folgende Auswertung wird schließlich für jedes Bild bei beiden Skalen ein Skalenmittelwert berechnet. Dazu wird zunächst für jeden Probanden bei jedem Bild ein Probanden-Mittelwert für beide Skalen berechnet. Aus diesen Probanden-Mittelwerten wird danach für jedes Bild bei beiden Skalen der Skalenmittelwert sowie die Standardabweichung berechnet. Einen Überblick über diese Skalenmittelwerte und deren Standardabweichungen, die Intervalle der Item-Mittelwerte und die Werte von Cronbach α mit 95 % Konfidenzintervall nach Duhachek (2004) für den Themenbereich Lichtausbreitung gibt die Tabelle 5.2.

Tabelle 5.2: Statistische Charakteristika der laePP und lafPP beim Themenbereich Lichtausbreitung: Skalenmittelwerte und deren Standardabweichung, die Intervalle der Item-Mittelwerte für jedes Bild und beide Subskalen sowie die Reliabilität α mit Konfidenzintervall.

	Gruppe	laePP		lafPP	
Skalenmittelwert und SD	AP	3,9	0,4	4,0	0,7
	CEP	2,8	0,2	2,9	0,5
Intervalle der Item-Mittelwerte	AP	[3,5 – 4,4]		[2,8 – 4,4]	
	CEP	[2,6 – 3,0]		[2,3 – 3,4]	
Reliabilität α mit 95 % Konfidenzintervall	AP	0,80 [0,72 – 0,88]		0,63 [0,47 – 0,78]	
	CEP	0,85 [0,79 – 0,91]		0,85 [0,79 – 0,91]	

Abschließend zeigt die Tabelle 5.3 für alle Themenbereiche die Anzahl N der vollständigen Antworten für das jeweilige Bild, die Reliabilität α nach Cronbach sowie die Intervalle, in denen die korrigierten Item Korrelationen liegen. Die Reliabilitäten weisen Werte im Bereich zwischen 0,58 und 0,88 auf, wobei 14 von 16 Werten oberhalb von 0,7 liegen. Ein in der Psychologie häufig genutzter Schwellenwert zur Beurteilung der Güte von Cronbach's α ist 0,7: größere Werte weisen auf eine gute Reliabilität hin, kleinere Werte auf eine akzeptable oder schlechte Reliabilität (Schmitt, 1996). In Literaturwerken der Statistik wird jedoch davor gewarnt, Urteile ausschließlich auf diesen Schwellenwert zu stützen (Field et al., 2012; Schmitt, 1996). Die Reliabilität wird auch durch die Anzahl der Items sowie durch die Korrelationen der Items untereinander beeinflusst. So wird beispielsweise in Field et al. (2012) bemerkt, dass bereits bei einer Anzahl von zwölf Items der Wert von Cronbach's α nicht mehr belastbar ist. Schmitt (1996) hält in seiner Zusammenfassung fest, dass Item Korrelationen stets mit angegeben werden sollten. Die Korrelationen der Items in den verschiedenen Themenbereichen liegen mit drei Ausnahmen über 0,3. Die drei Ausnahmen sind jeweils bei lafPP beim AP zu Lichtausbreitung, beim CEP zum Themenbereich Spektrum sowie beim AP zum Themenbereich

Reflexion, jeweils beim Item lafPP_2. Insgesamt ist nach Betrachtung der Werte für Cronbach's α sowie der Item Korrelationen eine gute Reliabilität für laePP und lafPP gewährleistet.

Die Anzahl der Bewertungen N variiert bei den einzelnen Bildern zwischen 57 und 60. Diese Abweichungen lassen sich zum einen auf die unterschiedliche Anzahl von Probanden in Untersuchungsgruppe G1 und Untersuchungsgruppe G2 zurückführen. Zum anderen haben vereinzelte Probanden nach ein oder zwei Bildern ihre Bewertung abgebrochen oder die Bewertung eines Bildes übersehen. Dennoch wurden ihre Bewertungen auch für einzelne Bilder in die Itemanalyse einbezogen.

Tabelle 5.3: Anzahl N der vollständigen Antworten, Reliabilität α und Item Korrelationen r_{it} der laePP und lafPP für jedes Bild.

Themenbereich	Instrument	Bildkategorie	N	Cronbach's α mit 95 % Konfidenzintervall	Mittelwert der Korrelation r_{it} , [Intervall]
Lichtausbreitung	laePP	AP	60	0,80; [0,72 – 0,88]	0,62 [0,48 - 0,73]
		CEP	58	0,85; [0,79 – 0,91]	0,67 [0,58 - 0,77]
	lafPP	AP	60	0,63; [0,47 – 0,78]	0,40 [0,03 - 0,65]
		CEP	58	0,85; [0,79 – 0,91]	0,66 [0,53 - 0,77]
Spektrum	laePP	AP	57	0,76; [0,67 – 0,86]	0,55 [0,43 - 0,73]
		CEP	58	0,86; [0,80 – 0,92]	0,68 [0,61 - 0,79]
	lafPP	AP	57	0,88; [0,82 – 0,93]	0,70 [0,50 - 0,81]
		CEP	58	0,58; [0,41 – 0,57]	0,33 [0,09 - 0,47]
Reflexion	laePP	AP	57	0,85; [0,78 – 0,91]	0,63 [0,59 - 0,69]
		CEP	58	0,86; [0,80 – 0,92]	0,66 [0,48 - 0,77]
	lafPP	AP	57	0,77; [0,68 – 0,86]	0,53 [0,16 - 0,73]
		CEP	58	0,80; [0,71 – 0,88]	0,59 [0,47 - 0,66]
Brechung	laePP	AP	58	0,78; [0,69 – 0,87]	0,55 [0,39 - 0,70]
		CEP	57	0,88; [0,83 – 0,93]	0,71 [0,61 - 0,78]
	lafPP	AP	58	0,83; [0,76 – 0,90]	0,63 [0,56 - 0,71]
		CEP	57	0,81; [0,73 – 0,89]	0,60 [0,40 - 0,74]

5.1.1 Prüfung der Normalverteilung

Als Grundlage zur Entscheidung von weiteren Analysen wurde die Normalverteilung der Antworten für beide Instrumente zur ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung überprüft. Dafür wurden für jedes Bild der Shapiro-Wilk-Test (Field et al., 2012) durchgeführt, welcher den Grad der Ähnlichkeit zu einer Normalverteilung quantifiziert. Mit dem Wilk-Kriterium kann die Verteilung als nicht normal angenommen werden, wenn der p -Wert kleiner als 0,01 ist (Baron, 2019). Im Folgenden werden die Subskalen laePP und lafPP getrennt betrachtet.

Zunächst wurde die Normalität für die Verteilung der Antworten bei jedem Item für jedes Bild geprüft. Dies ist bei der Entscheidung für einen Algorithmus zur Durchführung der Faktoranalyse relevant, siehe Kapitel 5.1.2. Der p -Wert des Shapiro-Wilk-Tests für die Normalität ist exemplarisch für das Item beim CEP zum Themenbereich Lichtausbreitung $p = 0,002$. Damit ist er kleiner als der Schwellenwert zu Bestätigung einer Normalität der Verteilung nach Baron (2019). Andere Items weisen ähnliche p -Werte auf. Das bedeutet, nach dem Wilk-Kriterium alleine sind die Verteilungen der einzelnen Items zu diesem Bild nicht als normalverteilt anzusehen. Dementsprechend sind die p -Werte der Items bei den anderen Bildern niedrig. Jedoch ist es nicht unbedingt zielführend die Normalität einer Verteilung mit nur sechs diskreten Werten zu beurteilen. Daher ist die Bestimmung mit dem Wilk-Kriterium nur bedingt aussagekräftig und es wurde eine zusätzliche visuelle Analyse der Verteilungen der Antworten für jedes Item in Histogrammen durchgeführt, siehe im Anhang in Kapitel A.2.3. Die Histogramme umfassen je nach Item nur fünf bis sechs diskrete Werte. Dabei weisen die Verteilungen aller Items ein klar bestimmtes Maximum und beidseitig abfallende Flanken auf. Ob diese Verteilungen der Normalverteilung entsprechen, lässt sich jedoch nicht für alle Histogrammen eindeutig feststellen. Es kann jedoch festgehalten werden, dass bei keinem Item eine extrem unregelmäßige, gleichförmige oder anormale Verteilung vorliegt. Somit muss kein weiteres Item ausgeschlossen werden. Jedoch bedeutet dies für die folgende Faktorenanalyse, dass ein Algorithmus verwendet werden sollte, der keine strikte Normalverteilung voraussetzt.

Für die spätere Varianzanalyse wird die Verteilung der Probanden-Mittelwerte in beiden Subskalen und für jedes Bild auf Normalität überprüft. Dazu wird zunächst für jeden Probanden der Mittelwert der jeweiligen Subskala berechnet. Anschließend wird aus diesen Probanden-Mittelwerten der Skalenmittelwert über die Probanden ermittelt. Die Analyse der Verteilungen für alle Themenbereiche und beide Instrumente sind in Tabelle 5.4 aufgeführt. Dabei werden die Testwerte des Shapiro-Wilk-Tests W , die p -Werte und Histogramme der Verteilung der Bewertungen pro Bild und Subskala gezeigt. In Grau sind Werte für $p < 0,01$ markiert, für dessen Bilder keine Normalverteilung der Antworten nach dem Shapiro-Wilk-Test der Bildbewertung vorliegt. Hier wurden ebenfalls zusätzlich zur Prüfung mit dem Shapiro-Wilk-Test Histogramme zur visuellen Prüfung der Normalität

erstellt, siehe exemplarisch in Abbildung 5.2. Zusätzlich sind in Tabelle 5.4 die Skalenmittelwerte und Standardabweichungen der Bildbewertungen aufgelistet, welche in Kapitel 6.1 ausführlich diskutiert werden.

Tabelle 5.4: Prüfung der Normalität der Bildwahrnehmung mit dem Shapiro-Wilk-Test W. Abkürzungen: LA: Lichtausbreitung, SP: Spektrum, RE: Reflektion, CL: Brechung, AP: Ästhetisches Bild, CEP: Klassenzimmer- Experimentbild, laePP: Instrument für ästhetische Bildwahrnehmung, lafPP: Instrument für affektive Bildwahrnehmung. In Grau markiert sind Verteilungen, die nicht signifikant normalverteilt ($< 0,01$) sind.

Bild	laePP			lafPP		
	<i>M</i> [<i>SD</i>]	<i>W</i>	<i>p</i>	<i>M</i> [<i>SD</i>]	<i>W</i>	<i>p</i>
LA, AP	3,9 [1,0]	0,98	0,57	3,9 [0,8]	0,94	0,007
LA, CEP	2,8 [1,1]	0,96	0,06	2,9 [1,1]	0,97	0,22
SP, AP	4,0 [1,0]	0,95	0,027	3,7 [1,2]	0,95	0,018
SP, CEP	3,7 [1,2]	0,98	0,67	3,5 [0,8]	0,98	0,36
RE, AP	4,1 [1,1]	0,96	0,05	4,0 [1,0]	0,95	0,04
RE, CEP	2,5 [1,1]	0,94	0,012	2,6 [1,0]	0,95	0,016
CL, AP	4,1 [1,0]	0,98	0,68	3,7 [1,2]	0,98	0,67
CL, CEP	2,8 [1,2]	0,95	0,03	2,7 [1,1]	0,94	0,009

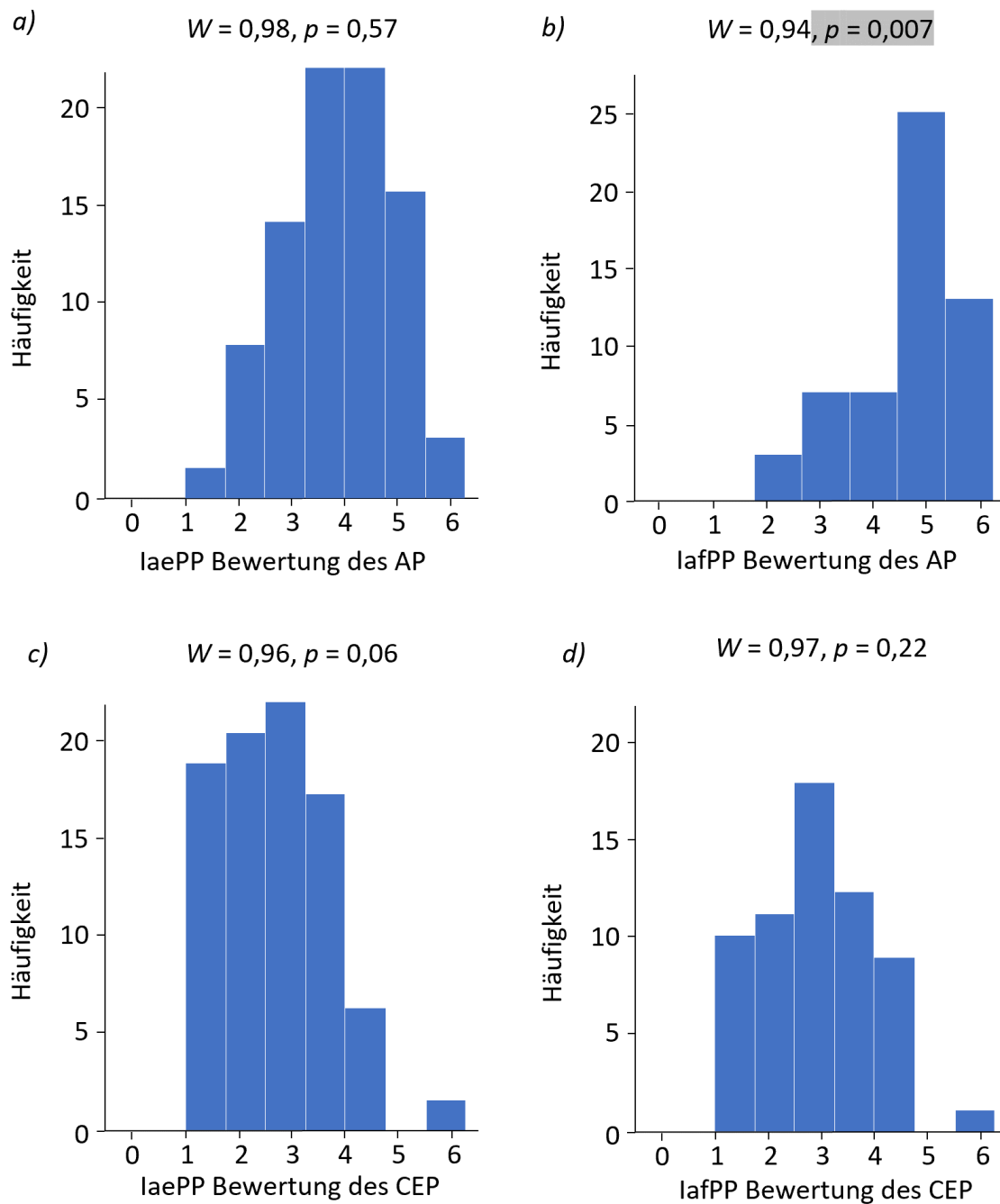


Abbildung 5.2: Histogramme der Bewertung von laePP sowie lafPP des APs und CEPs zum Themenbereich Lichtausbreitung. a) zeigt das Histogramm zur laePP Bewertung des APs; b) das Histogramm zu lafPP Bewertung des APs; c) das Histogramm zu laePP Bewertung des CEPs; d) das Histogramm zu lafPP Bewertung des CEPs. Für die weiteren Themenbereiche sind diese Histogramme im Anhang im Kapitel A.2.3 zu finden.

Prüfung der Homogenität der Varianzen

Die Wahl des Verfahrens zur Varianzanalyse erfordert zusätzlich eine Prüfung der Homogenität der Varianzen. Die Analyse der Homogenität der Varianzen erfolgt mithilfe des Levene-Tests (Field et al., 2012). Der Levene-Test prüft, ob die Varianzen zweier Variablen bzw. einer Variablen in zwei Gruppen eine vergleichbare Streuung aufweisen (Field et al., 2012). Ein p -Wert größer als 0,05 bedeutet, dass der Test nicht signifikant ist; dh. die Varianzen sind homogen verteilt und nicht signifikant verschieden. Der Levene-Test wurde für jedes Bildpaar und beide Subskalen ausgeführt. Dabei wurde jeweils das CEP mit dem AP verglichen. In sechs von acht Tests ist der Levene -Test nicht signifikant, siehe Tabelle 5.5.

Damit sind die Bedingungen für parametrische Tests, Homogenität der Varianzen und Normalverteilung der Werte, nicht für alle Bilder erfüllt. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf zusätzlich der Wilcoxon-Rangsummentest mit Kontinuitätskorrektur durchgeführt (Field et al., 2012). Dieser Test gewährleistet die Belastbarkeit der Ergebnisse bei nicht-parametrischen Daten. Zur Vergleichbarkeit mit anderen Studien wird jedoch, trotz der nicht vollständig erfüllten Voraussetzungen, bei allen Analysen zuerst ein robuster parametrischer Test durchgeführt.

Tabelle 5.5: Levene-Test mit Freiheitsgeraden, F -Werten und Signifikanzen. *ns* steht für nicht signifikant.

Themenbereich und Instrument	F	p
LA, laePP	$F(1, 109) = 0,31$	ns
SP, laePP	$F(1, 109) = 2,48$	ns
RE, laePP	$F(1, 109) = 0,08$	ns
CL, laePP	$F(1, 109) = 2,43$	ns
LA, lafPP	$F(1, 109) = 4,89$	0,029
SP, lafPP	$F(1, 109) = 6,07$	0,015
RE, lafPP	$F(1, 109) = 0,001$	ns
CL, lafPP	$F(1, 109) = 0,37$	ns

5.1.2 Explorative Faktoranalyse der Skala zur wahrgenommenen visuellen Ästhetik

Die Faktorenanalyse ist ein statistisches Verfahren, das zur Identifizierung zugrunde liegender Beziehungen zwischen Variablen eingesetzt wird (Brandt, 2020). Besonders in der Psychologie und in Sozialwissenschaften findet die Faktorenanalyse eine häufige Anwendung, wenn Daten durch Fragebögen oder Tests mit mehreren Items erhoben werden (Brandt, 2020). Die Items sind in der Regel so konzipiert, dass sie latente Konstrukte messen, die nicht direkt beobachtbar sind, wie beispielsweise Persönlichkeitsmerkmale oder Einstellungen. Die Faktorenanalyse trägt dazu bei, die Komplexität der Daten zu reduzieren, indem sie Items zu Faktoren zusammenfasst, die diese latenten Konstrukte darstellen (Brandt, 2020).

In der vorliegenden Arbeit wird eine explorative Faktorenanalyse verwendet, um das neu zusammengestellte Instrument wahrgenommen visuelle Ästhetik bestehend aus laePP und lafPP zu charakterisieren. Dabei wird zuerst die Dimensionalität der verwendeten Skala untersucht, ohne eine vorgegebene Struktur aufzuerlegen. Beide Instrumente, laePP und lafPP, bestehen aus sechs bzw. fünf Items, mit denen die Konstrukte ästhetische bzw. affektive Bildwahrnehmung gemessen werden sollen. Die Faktorenanalyse soll klären, wie viele Faktoren den Items zugrunde liegen und ob die Faktoren eine Einfachstruktur haben. Dies ist von zentraler Bedeutung für die Validierung der Skala und um sicherzustellen, dass sie die beabsichtigten Konstrukte präzise erfasst. Im Folgenden werden Entscheidungen, Vorgehen sowie die Ergebnisse der explorativen Faktorenanalyse beschrieben.

Zur Bestimmung der Dimension wurde der k-Means-Algorithmus in Kombination mit der Silhouetten Analyse verwendet (Rousseeuw, 1987). Die Analyse erfolgte mit dem R-Paket „NbClust“ (Charrad et al., 2014). Der k-Means-Algorithmus teilt die Daten in eine vorgegebene Anzahl von Clustern ein. Anschließend wird für den Silhouettenkoeffizient die euklidische Distanz der Punkte berechnet. Somit wird hier keine Normalverteilung der Daten vorausgesetzt, weshalb diese Methode angewendet wird. Das Mittel über alle Cluster ergibt den Silhouettenkoeffizienten, welcher somit die Qualität Clusteraufteilung angibt. Ein Wert für das Clustering größer als 0,5 wird dabei als gute Voraussetzung gewertet (Dalmaijer et al., 2022; Kaufmann & Rousseeuw, 1990). Das Ablesen der Dimension erfolgt aus der grafischen Darstellung der Silhouettenkoeffizienten: der größte Wert entspricht der wahrscheinlichsten Dimension der Skala. Für die wahrgenommene visuelle Ästhetik Skala ist der Silhouettenkoeffizient in Abhängigkeit der vorgegebenen Anzahl der Faktoren für alle Themenbereiche zusammen in Abbildung 5.3 gezeigt. Dabei ist ein klares Maximum bei zwei Faktoren zu erkennen, welches einen Silhouettenkoeffizient von 0,6 aufweist. Silhouettenkoeffizienten $> 0,5$ entsprechen einem gutem Clustering (Dalmaijer et al., 2022; Kaufman & Rousseeuw, 1990).

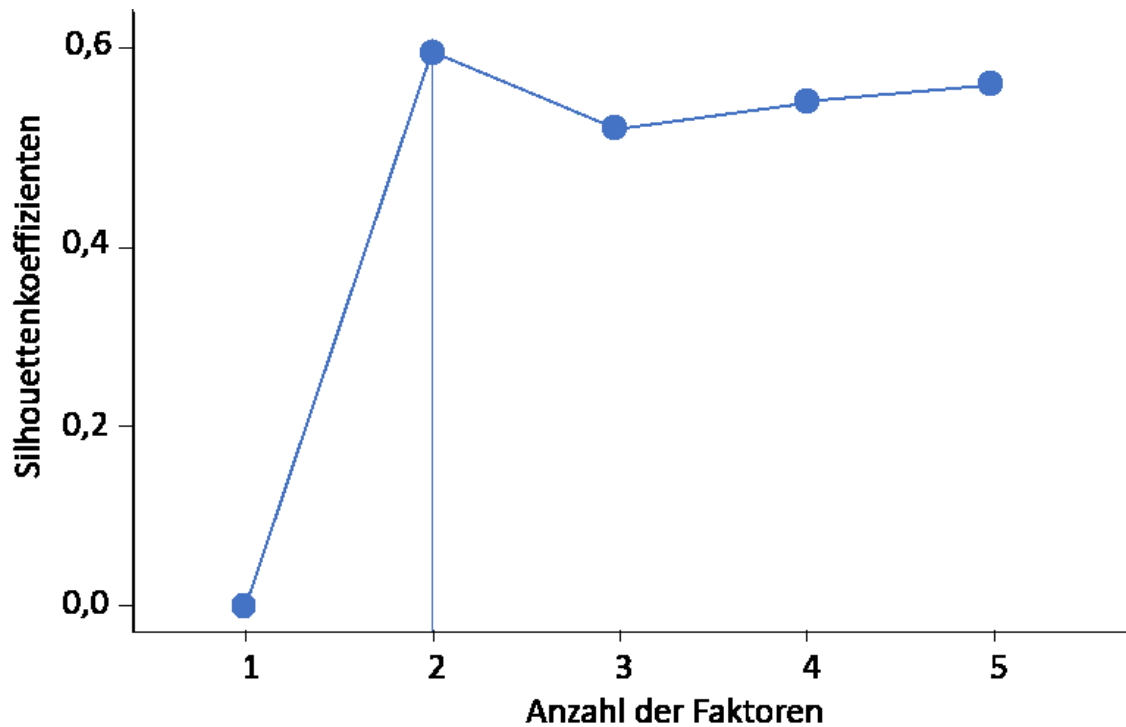


Abbildung 5.3: Silhouetten-Kriterium für die Skala zur wahrgenommenen visuellen Ästhetik aller Themenbereiche und Bilderkategorien. Die senkrechte Linie verdeutlicht, bei welcher Anzahl von Faktoren der höchste Silhouettenkoeffizient erreicht wird. Diese Anzahl entspricht der Dimensionalität der Skala.

Als nächstes wurde die Faktoranalyse für jedes Bild separat durchgeführt. Die individuellen Faktoranalysen sind im Anhang in Kapitel A.2.5 zu finden und exemplarisch für den Themenbereich Lichtausbreitung in Abbildung 5.4 abgebildet.

Auch für alle Bilder zeigt sich, dass der Silhouettenkoeffizient für zwei Faktoren stets ein gutes Clustering ($> 0,5$) ergibt (Dalmaier et al., 2022; Kaufman & Rousseeuw, 1990). Zudem ist in allen Datensätzen mit nur einer Ausnahme der Silhouettenkoeffizient bei zwei Faktoren der höchste oder zweit-höchste Wert. Die Analyse mit dem Silhouetten-Kriterium untermauert somit die Annahme, dass die Skala der wahrgenommenen visuellen Ästhetik aus zwei Faktoren besteht. Hier besteht weiterhin die Vermutung, dass diese zwei Faktoren die ästhetische und die affektive Bildwahrnehmung sind.

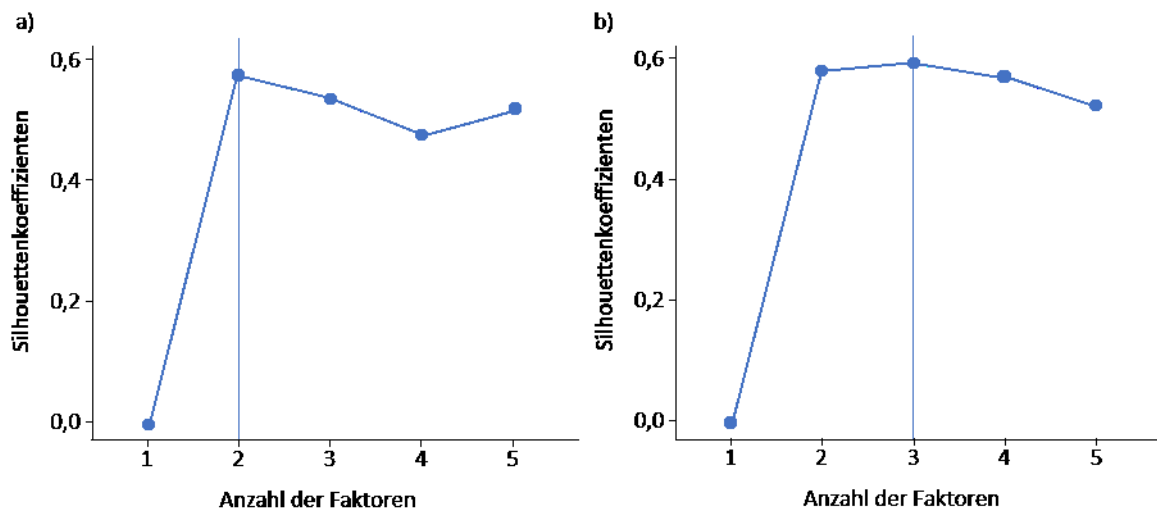


Abbildung 5.4: Silhouetten-Kriterium für den Themenbereich Lichtausbreitung. Dabei zeigt a) das Silhouetten-Kriterium für die Skala zur wahrgenommenen visuellen Ästhetik beim Themenbereich Lichtausbreitung für das AP und b) für das zugehörige CEP. Die senkrechte Linie verdeutlicht, bei welcher Anzahl von Faktoren der höchste Silhouettenkoeffizient erreicht wird. Diese Anzahl entspricht der Dimensionalität der Skala. In der linken Grafik deutet der Verlauf auf zwei Faktoren hin. In der rechten Grafik ist der höchste Silhouettenkoeffizient bei drei Faktoren. Allerdings bleibt der Silhouettenkoeffizient bei zwei und bei vier Faktoren nur geringfügig niedriger als bei drei Faktoren.

Für eine tiefergehende Analyse der Vermutung, dass die Skala in zwei Faktoren unterteilt werden kann, wird als nächstes mit einer Rotation die günstigste Verteilung von Faktorladungen auf die zwei Faktoren beurteilt. Dabei wird erzwungen, dass die Analyse zwei zugrunde liegende Faktoren annimmt. Für die Rotation muss zwischen orthogonalen oder obliquen Rotationsverfahren entschieden werden. Dabei sollte eine oblique Methode gewählt werden, wenn eine Korrelation der Faktoren erwartet wird (Brandt, 2020; Revelle, 2023). Für die Skala wahrgenommene visuelle Ästhetik wird daher die oblique Methode, „oblimin“ gewählt. Die Faktorladungen sind in Tabelle 5.6 dargestellt. Ein typischer Schwellenwert der Faktorladungen ist 0,3. Da Werte $> 0,3$ als aussagekräftig beurteilt werden (Brandt, 2020), sind sie der Tabelle 5.6 in fetter Schrift gelistet. Nach der Rotation laden alle Faktoren bis auf lafPP_1 entweder auf Faktor 1 oder auf Faktor 2. Auffällig ist, dass alle Items zur ästhetischen Bildwahrnehmung des laePP bis auf laePP_6 auf Faktor 1 laden. laePP_6 ist dabei das Item zur Originalität. Hier könnte man vermuten, dass nicht allen Schülerinnen und Schülern das Wort „originell“ geläufig ist. Des Weiteren laden lafPP_1, lafPP_3 und lafPP_5 hauptsächlich auf Faktor 2. Die Ausnahmen des Instruments zur affektiven Bildwahrnehmung lafPP_2 und lafPP_4 laden beide auf den „falschen“ Faktor 1. Dabei sind beide Items Umschreibungen eines ähnlichen Zustandes: „Fühle mich schläfrig“ bzw. „Fühle mich wach“. Daher ist es naheliegend, dass ihre Faktorladung stark korreliert.

Die Tabelle 5.6 zeigt außerdem die Kommunalität sowie die Spezifität der Items nach der Rotation. Eine hohe Kommunalität weist auf eine hohe gemeinsame Varianz mit dem Faktor hin (Field et al., 2012). Dies bedeutet, dass das Item gut auf den Faktor lädt (Brandt, 2020). Die Items zeigen

Kommunalitäten zwischen 0,39 und 0,90. Nach Tabachnick und Fidell (2013) weisen für ein $N < 100$ Kommunalitäten $> 0,6$ und hohe Faktorladungen auf gut bestimmte Faktoren hin. Zudem sind Werte für Kommunalitäten kleiner als 0,2 nicht akzeptabel (Tabachnick & Fidell, 2013). Die in der Tabelle gezeigten Kommunalitäten sind demnach nicht gut, jedoch sind alle mindestens akzeptabel. Darüber hinaus gibt die Tabelle 5.6 die Komplexität der Items an. Die Item Komplexität beschreibt, inwieweit ein Item auf mehrere Faktoren lädt. Wie erwartet ist die Komplexität bei dem Item lafPP_1, das auf beiden Faktoren lädt, hoch. Auch laePP1, welches nur eine geringe Ladung auf den ersten Faktor und eine schwache Ladung auf den zweiten Faktor aufweist, hat eine hohe Komplexität. Ansonsten sind die Komplexitäten gering, was auf eine Einfachstruktur der beiden Faktoren hindeutet.

Tabelle 5.6: Ergebnis der explorativen Faktorenanalyse mit zwei Faktoren und einer obliquen Rotation exemplarisch für das CEP zum Themenbereich Lichtausbreitung. Die ersten beiden Spalten zeigen die Ladungen der Items auf die beiden Faktoren an. Die letzten beiden Spalten listen die Kommunalität sowie die Itemkomplexität. Faktorladungen $> 0,3$ sind fett gedruckt, da sie über dem Schwellenwert als gut beurteilt werden.

Itemkürzel	Ladung auf Faktor 1	Ladung auf Faktor 2	Kommunalität	Item-Komplexität
laePP_1	0,39	0,27	0,39	1,8
laePP_2	0,68	0,20	0,70	1,2
laePP_4	0,64	0,17	0,60	1,1
laePP_5	0,87	-0,04	0,71	1,0
laePP_6	0,23	0,47	0,44	1,5
lafPP_1	0,38	0,54	0,73	1,8
lafPP_2	0,80	-0,12	0,51	1,0
lafPP_3	-0,03	0,97	0,90	1,0
lafPP_4	0,67	0,03	0,49	1,0
lafPP_5	0,01	0,73	0,54	1,0

5.1.3 Zusammenfassung der Itemanalyse mit explorativer Faktoranalyse

Die Itemanalyse der Skala zur Wahrnehmung visueller Ästhetik legt nahe, das Item laePP_3 auszuschließen. Die Werte für Cronbach's α sowie die korrigierten Itemkorrelationen zeigen danach eine gute Reliabilität des laePP sowie lafPP. Die explorativen Faktorenanalyse, durchgeführt mithilfe des k-Means-Algorithmus und des Silhouettenkriteriums, deutet darauf hin, dass die Skala zur Wahrnehmung visueller Ästhetik aus zwei Faktoren besteht. Nach einer Rotation zeigt das CEP zum Thema Lichtausbreitung eine annähernde Einfachstruktur, bei der die Items gut auf den Konstrukten

ästhetische und affektive Bildwahrnehmung laden. Die theoretischen Grundlagen und die Herkunft der Items legen jedoch eine klare Zuordnung der Items für die zwei Konstrukte vor. Bei den weiteren Bildern sind die Zuordnungen der Faktorladung weniger eindeutig. Daher werden die weiteren Analysen der Wahrnehmung visueller Ästhetik mit zwei Subskalen durchgeführt, die aus den Instrumenten laePP sowie lafPP bestehen.

5.2 Aufbereitung der Daten des Wissenstests Optik

Der in Kapitel 4.2.5 beschriebene Wissenstest Optik wurde sowohl vor als auch nach der Intervention im Rahmen eines Prä-Posttest-Designs durchgeführt. Bei dem Wissenstest gibt es für jede richtige Antwort einen Punkt, sodass maximal 32 Punkte erreicht werden können. Die Aufgaben bzw. Items sind dabei im Richtig/Falsch-Format gestaltet, was in der Fachsprache als dichotome Items bezeichnet wird. Zur deskriptiven Statistik solcher Items wird die Itemschwierigkeit berechnet, die dem Anteil der richtigen Antworten für eine Aufgabe bzw. ein Item entspricht. Damit die Itemschwierigkeit als Testcharakteristik vergleichbar ist, wird sie normiert. Dazu wird der Mittelwert der jeweiligen Items berechnet und auf einen Wert zwischen Null und Eins normiert. Die Tabelle 5.7 zeigt exemplarisch für den Themenbereich Reflexion den normierten Mittelwert bzw. die Itemschwierigkeit M und die Standardabweichungen SD eines Items für beide Wissenstests. Die deskriptiven Statistiken der weiteren Themenbereiche sind im Anhang in Kapitel A.2.6 in Tabelle A.3 bis Tabelle A.5 aufgeführt. Ein erwünschter Wert für die Itemschwierigkeit liegt zwischen 0,3 und 0,9 (Field et al., 2012). Itemschwierigkeiten außerhalb dieses Bereichs sind zur besseren Übersicht in der Tabelle 5.7 sowie in Tabelle A.3 bis Tabelle A.5 im Anhang in Orange markiert. Zusätzlich sind positive Differenzen der Mittelwerte von Post-Prätest, also mehr richtigen Antworten im Posttest, grün eingefärbt. Im Folgenden wird auf diese Auffälligkeiten der deskriptiven Statistik der Wissenstests eingegangen.

Tabelle 5.7: Die Tabelle zeigt Mittelwert bzw. Itemschwierigkeit M , Standardabweichung SD , Korrelation zu den anderen Items R_{pbi} und Differenz zwischen den Mittelwerten von Prä- und Posttest für den Themenbereich Reflexion. Bei Mittelwerten und der Korrelation sind auffällige Zellen Orange eingefärbt. Die Differenz ist grün eingefärbt, falls sie positiv ist (mehr richtige Antworten im Posttest). $N_{AP} = 55$, $N_{CEP} = 54$.

Item Kürzel	Itemformulierung	Gruppe	Prätest		Posttest		Differenz zwischen Post- und Prätest
			M	SD	M	SD	
Ref_1	Ein Spiegel vertauscht vorne und hinten.	AP	0,27	0,45	0,24	0,43	-0,04
		CEP	0,13	0,34	0,28	0,45	0,15
Ref_2	Ein Spiegel vertauscht keine Seiten.	AP	0,76	0,43	0,58	0,50	-0,18
		CEP	0,91	0,29	0,81	0,39	-0,09
Ref_3	Ein Spiegel vertauscht oben und unten.	AP	0,82	0,39	0,75	0,44	-0,07
		CEP	0,93	0,26	0,70	0,46	-0,22
Ref_4	Das Spiegelbild befindet sich doppelt so weit hinter dem Spiegel wie der Gegenstand vor dem Spiegel.	AP	0,64	0,49	0,65	0,48	0,02
		CEP	0,85	0,36	0,74	0,44	-0,11
Ref_5	Das Spiegelbild ist näher am Spiegel als der Gegenstand vor dem Spiegel.	AP	0,76	0,43	0,76	0,43	0,00
		CEP	0,81	0,39	0,81	0,39	0,00
Ref_6	Das Spiegelbild ist genauso weit hinter dem Spiegel wie der Gegenstand vor dem Spiegel.	AP	0,82	0,39	0,71	0,46	-0,11
		CEP	0,76	0,43	0,67	0,48	-0,09
Ref_7	Ein Spiegel vertauscht links und rechts.	AP	0,20	0,40	0,25	0,44	0,05
		CEP	0,04	0,19	0,22	0,42	0,19
Ref_8	Das Spiegelbild ist weiter hinter dem Spiegel als der Gegenstand vor dem Spiegel.	AP	0,75	0,44	0,67	0,47	-0,07
		CEP	0,83	0,38	0,69	0,47	-0,15

5.2.1 Itemschwierigkeit im Wissenstest Optik

Die Itemschwierigkeit eines Items beschreibt, welcher Anteil der Probanden das jeweilige Item richtig beantwortet hat. In Tabelle 5.7 sind bereits zu hohe ($M < 0,3$) sowie zu niedrige ($M > 0,9$) (Field et al., 2012) Itemschwierigkeiten in Orange markiert. Insgesamt, bis auf eine Ausnahme (Ref_1), wurden zu schwere Items des Prätests ($M < 0,3$) im Posttest besser beantwortet. Besonders

hervorzuheben ist hier Item Ref_7 „Ein Spiegel vertauscht links und rechts“. Die Eigenschaft eines Spiegels, rechts und links nicht zu vertauschen, wird in der Lernumgebung behandelt. Dieses Item ist zwar sowohl im Prä- als auch im Posttest zu schwer ($M < 0,3$), allerdings erzielen die Schülerinnen und Schüler bei diesem Item im Posttest insgesamt deutlich mehr Punkte als im Prätest. Beim Prätest sind einige Items zu einfach ($M > 0,9$), während beim Posttest keins der Item zu einfach war. Das könnte darauf hindeuten, dass Schülerinnen und Schüler beim Posttest eher Leichtsinnsfehler gemacht haben und damit nicht mehr so konzentriert waren.

5.2.2 Unterschied zwischen den Untersuchungsgruppen G1 und G2

Im Folgenden wird untersucht, ob es signifikante Unterschiede im Wissenstest Optik zwischen den Untersuchungsgruppen G1 und G2 bei den einzelnen Themenbereichen vor der Intervention gibt. Dazu wird die Effektstärke d nach Cohen (1988) der Differenzen der Mittelwerte in den Themenbereichen der Prätests berechnet, siehe Tabelle 5.8. Der Themenbereich Lichtausbreitung zeigt einen kleinen Effekt, jedoch auch ein großes Konfidenzintervall. Bei den übrigen Themenbereichen zeigen die Berechnungen nach Cohen (1988) keinen Effekt, die Konfidenzintervalle erreichen keine mittleren Effekte. Das lässt schließen, dass die Untersuchungsgruppen G1 und G2 keine signifikanten Unterschiede in ihrem Wissen zur geometrischen Optik vor der Intervention aufweisen.

Tabelle 5.8: Vergleich der Untersuchungsgruppen G1 und G2 im Prätest mit Mittelwert M , Standardfehler SE und Effektstärke d .

Themenbereich	Gruppe	M	SE	Cohens d [CI]
Lichtausbreitung	G1, AP	0,56	0,09	0,29
	G2, CEP	0,63	0,06	[-0,09 - 0,66]
Spektrum	G2, AP	0,60	0,07	0,13
	G1, CEP	0,62	0,07	[-0,25 - 0,50]
Reflexion	G1, AP	0,63	0,08	0,10
	G2, CEP	0,66	0,12	[-0,27 - 0,48]
Brechung	G2, AP	0,45	0,07	0,06
	G1, CEP	0,46	0,04	[-0,31 - 0,43]

5.3 Aufbereitung der Daten zum Interesse

Das Interesse an der Physik, am Fotografieren und die allgemeine Motivation zur Physik kann das Bearbeiten der Lernaufgaben und die Faszination an den Bildern beeinflussen. Daher wird es als Prädiktorvariable aufgenommen. Die Skalen zum Interesse sind aufgeteilt in die Instrumente Interesse an der Physik (I_Phy), Interesse am Fotografieren (I_Ph0) und intrinsische Motivation/Engagement (IME). Die Items können Werte von 1 „stimme gar nicht zu“ bis 6 „stimme vollständig zu“ annehmen. Vor der Bestimmung der Item-Mittelwerte werden die Werte von den Items I_Phy_2, I_Phy_4, I_Phy_6, I_Phy_7 und I_Ph0_2 umgekehrt, damit ein hoher Wert bei allen Items einer positiven Einstellung entspricht. Die Instrumente mit Item-Mittelwerten, Standardabweichungen und Reliabilität α nach Cronbach ohne das jeweilige Item sind in Tabelle 5.9 präsentiert.

Tabelle 5.9: Reliabilität der Subskalen Interesse Physik, Interesse am Fotografieren sowie aktuelle Motivation/Engagement, N=113.

Itemkürzel	Item Text	<i>M</i>	<i>SD</i>	α_c^*
I_Phy_1	Physik ist spannend.	3,77	1,30	0,83
I_Phy_2	Freiwillig würde ich mich nicht mit Physik beschäftigen.	3,32	1,45	0,84
I_Phy_3	Physik ist mir persönlich wichtig.	3,04	1,20	0,83
I_Phy_4	Physik macht mir keinen Spaß.	4,02	1,29	0,83
I_Phy_5	Physik ist nützlich für mich.	3,85	1,28	0,84
I_Phy_6	Physik ist mir gleichgültig.	3,86	1,33	0,83
I_Phy_7	Physik ist langweilig.	4,14	1,34	0,83
I_Ph0_1	Fotografieren ist spannend.	3,83	1,54	0,79
I_Ph0_2	Freiwillig würde ich mich nicht mit Fotografieren beschäftigen.	4,19	1,62	0,86
I_Ph0_3	Fotografieren ist mir persönlich wichtig.	3,91	1,62	0,83
IME_1	Ich schaue zu Hause z. B. in Büchern oder im Internet nach, um mehr zu physikalischen Themen zu erfahren.	2,56	1,31	0,68
IME_2	Ich strenge mich in Physik mehr an als in anderen Fächern.	3,16	1,21	0,71
IME_3	Ein Problem in Physik zu lösen, macht mir Spaß.	3,42	1,19	0,67
IME_4	Wenn ich mich mit physikalischen Themen befasse, merke ich nicht, wie die Zeit vergeht.	2,81	1,40	0,68

Die Skalenmittelwerte zeigt zusammenfassend Tabelle 5.10. Auffallend ist hier, dass bei der Subskala Interesse am Fotografieren der Skalenmittelwert sowie auch die Standardabweichung am größten ist. Gründe dafür könnten sein, dass Fotografieren mithilfe allgegenwärtiger Smartphones

jederzeit möglich ist, jedoch ein professionelles Fotografieren auch in der Lebenswelt von Schülerinnen und Schülern differenziert wahrgenommen wird.

Tabelle 5.10: Zusammenfassung der Instrumente zur Messung des Interesses.

Instrument	<i>M</i>	<i>SD</i>	Intervall	α
Interesse an der Physik (I_Phy)	3,7	1,4	3,0-4,1	0,85
Interesse am Fotografieren (I_Photo)	4,0	1,6	3,8-4,2	0,87
Intrinsische Motivation/Engagement (IME, Prä)	3,0	1,3	2,6-3,4	0,72

5.4 Affektive Variablen bezüglich des Arbeitens mit Bildern

Zusätzlich wurden nach dem Arbeiten mit Bildern in der Lernumgebung mit den Instrumenten Ästhetische Emotionen, Neugierde, Epistemische Emotionen, intrinsische Motivation/Engagement, Stress sowie jeweils einem Item zu negativen Emotionen und der mentalen Anstrengung weitere affektive Variablen erhoben. Es sollte untersucht werden, inwiefern der Lernzuwachs von diesen Variablen beeinflusst wird. Da jedoch kein Lernzuwachs festgestellt werden konnte, wurden diese affektiven Variablen nicht weiter ausgewertet.

5.5 Bewertung der Lernaufgaben

Die fachliche Bearbeitung der Lernaufgaben in der Lernumgebung wurde mithilfe eines Bewertungsschemas beurteilt. Ein Bewertungsschema war insofern nötig, da es für Einfach- oder Mehrfachauswahlfrage zwar eindeutige richtige bzw. falsche Antworten gibt, jedoch bei Freitextaufgaben die Eindeutigkeit einer Bewertung in Punkten nicht immer gegeben ist. Für eine möglichst objektive und reliable Bewertung der fachlichen Bearbeitung wurde daher ein Bewertungsschema mit einem Punktevergabesystem, siehe Anhang in Kapitel A.3, erstellt. Die Reliabilität des Bewertungsschemas wurde durch eine Prüfung der Interraterreliabilität bestätigt. Dazu wurden 20 zufällig ausgewählte ausgefüllte Bögen der Lernaufgaben von drei Personen nach dem Bewertungsschema bewertet. Die übrigen Bögen wurden von einer der Personen mit dem gleichen Bewertungsschema bewertet. Die Interraterreliabilität wird mit Krippendorff's Alpha berechnet. Krippendorff's Alpha erlaubt im Gegensatz zu Cohens Kappa oder Fleiss Kappa die Berechnung der Interraterreliabilität von Daten einer ordinalen oder metrischen Skala und zusätzlich den Vergleich mehrerer bewertenden Personen (Zapf et al., 2016). Für die Berechnung wird das "irr"-Paket in R (Gamer et al., 2005) eingebunden. Die vergebenen Punktzahlen für die jeweiligen Aufgaben stimmen

in 73% der Antworten bei allen drei Bewertern überein. Der Wert von Krippendorff's Alpha von 0,88 [0,85 - 0,90] bestätigt die statistische Signifikanz der Interraterreliabilität.^F

5.6 Aufbereitung der Daten zur Bearbeitungszeit

Während des Bearbeitens der Aufgaben in der Lernumgebung wurden bei ausgewählten Probanden die Zeitpunkte aufgezeichnet, zu denen sie jeweils eine Aufgabe abgeschlossen haben. Dadurch ließen sich individuelle Rückschlüsse auf die benötigte Zeit für jede Lernaufgabe ziehen. Aus den aufgezeichneten Zeitpunkten wurden Zeitspannen berechnet, die als eine obere Grenze für die Bearbeitungszeit einer Lernaufgaben gewertet werden können. Da jeweils nur die Zeitpunkte des Abschließens der Lernaufgabe aufgezeichnet werden, gibt es keinen Zeitspanne für die erste Lernaufgabe. Die Zeiten konnten den Probanden über die Nummern der IP- Adressen der iPads zugeordnet werden, wodurch auch die Zugehörigkeit zu den Untersuchungsgruppen hergestellt werden konnte. Obwohl die Zeitspannen einfach berechnet werden konnten, waren an einigen Stellen manuelle Korrekturen notwendig:

- Schülerinnen und Schüler bearbeiten die Lernaufgaben manchmal in einer anderen Reihenfolge als vorgesehen. Hier müssen die Zeiten für die Lernaufgaben manuell angepasst werden.
- Manche Lernaufgaben werden von Schülerinnen und Schülern ausgelassen oder sie klicken nicht auf „Überprüfen“. In diesen Fällen gibt es keine Zeitspanne für die betreffende Aufgabe. Auch für die folgende Aufgabe kann dann keine Zeitspanne zugeordnet werden, da nicht erfasst wird, wieviel Zeit der Proband auf welche der beiden Lernaufgaben verwendet hat.
- Schülerinnen und Schüler drücken manchmal bei einer Aufgabe mehrmals auf „Überprüfen“. Dies kann passieren, wenn zunächst das Antwortfeld leer gelassen wird. In diesem Fall gibt das Programm dem Probanden eine weitere Chance, die Aufgabe auszufüllen und erneut zu überprüfen. Für die Auswertung wurden die Zeitspannen bis zum letzten Klick auf „Überprüfen“ verwendet.

Anschließend mussten Ausreißer beseitigt werden. Bei den Zeitdifferenzen gab es einige Aufgaben, welche von einzelnen Probanden wesentlich länger bearbeitet wurden als die Aufgabe im Durchschnitt. Hierbei wurden die Bearbeitungszeiten wahrscheinlich durch Nachfragen oder kurze Pausen verlängert. Jedoch ist es wahrscheinlich, dass die Probanden sich nicht mehr nur mit der Aufgabe beschäftigt hatten. Daher werden Zeitspannen, die außerhalb des Drei-Sigma-Bereichs liegen,

^F Ein Wert für alpha > 0,8 ist gut, ein Wert > 0,6 ist akzeptabel, nach Zapf et al. (2016).

ausgeschlossen (Field et al., 2012). Danach wurden Mittelwerte und Standardabweichungen für jede Aufgabe berechnet. Die Ergebnisse bezüglich der Analysen der Bearbeitungszeiten werden in Kapitel 7.2.2 vorgestellt und diskutiert. Mit der Aufbereitung der Daten in den Kapiteln 5.1 bis 5.6 sind damit die Grundlagen für die weitere Auswertung der Schulstudie hinsichtlich der Forschungsfragen gelegt.

6 Ergebnisse zur ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung

Im folgenden Kapitel werden die Forschungsfragen 1 und 2 beantwortet, indem Analysen und Ergebnisse aus den erhobenen Daten der beiden Studien präsentiert werden. In der Schulstudie bewerteten die Schülerinnen und Schülern die einzelnen Bilder hinsichtlich der wahrgenommenen visuellen Ästhetik mit den Instrumenten zur ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung (laePP und lafPP). Nach der initialen Datenaufbereitung, Normalitäts- und Homogenitätsprüfung sowie Faktoranalyse aus Kapitel 5.1 kann nachfolgend in Kapitel 6.1 die Bewertung der wahrgenommenen visuellen Ästhetik analysiert werden. Mithilfe von Effektstärken wird die Bedeutsamkeit der Differenzen zwischen den Bewertungen von APs und CEPs untersucht. In Kapitel 6.2 werden ergänzend die Ergebnisse aus der Interviewstudie vorgestellt. In Kapitel 6.3 wird die ästhetische und affektive Bildwahrnehmung hinblickend auf Forschungsfragen 1 und 2 diskutiert.

6.1 Ergebnisse aus der Schulstudie

Die subjektiven Bewertungen der APs und CEPs werden auf beiden Subskalen laePP und lafPP verglichen. Dazu werden Effektstärken nach Cohen (1988) und Konfidenzintervalle der Skalenmittelwerte für jedes Bildpaar mit dem R-Paket „effectsize“ (Ben-Shachar et al., 2020; R Core Team, 2022) berechnet. Für die folgende Diskussion wird die gängige Einteilung in kleine ($0,2 < d < 0,5$), mittlere ($0,5 \leq d < 0,8$) oder große ($0,8 \leq d$) Effekte verwendet (Cohen, 1988).

Die Effektstärken und Konfidenzintervalle für alle Bildpaare sind mitsamt Skalenmittelwerten und Standardabweichungen in Abbildung 6.1 visualisiert sowie in Tabelle 6.1 dargestellt. Signifikante Differenzen zwischen den Bewertungen der APs und der CEPs sind erkennbar. Bei den Themen Lichtausbreitung, Reflexion und Brechung liegen die Skalenmittelwerte der APs außerhalb der Standardabweichungen der Skalenmittelwerte der CEPs. Diese Differenzen weisen mittlere bis hohe Effektstärken für laePP ($d = 1,05 - 1,56$) als auch für lafPP ($d = 0,85 - 1,48$) auf. Im Vergleich zwischen laePP und lafPP zeigen sich bei den einzelnen Bildern keine signifikanten Differenzen der Skalenmittelwerte. Es kann lediglich angemerkt werden, dass bei laePP die Effektstärken höher sind als bei lafPP und damit die Bedeutsamkeit der Skala laePP größer ist als die Skala lafPP.

Bezüglich der Bilder zum Themenbereich Spektrum fällt auf, dass die Unterschiede zwischen des APs und des CEPs am geringsten sind. Auch die Effektstärken weisen nur einen niedrigen Effekt oder keinen Effekt auf. Eine detaillierte Betrachtung zeigt, dass insbesondere das CEP besser bewertet wurde als die übrigen CEPs. Das AP zu Themenbereich Spektrum wird dagegen nicht signifikant schlechter bewertet als die übrigen APs.

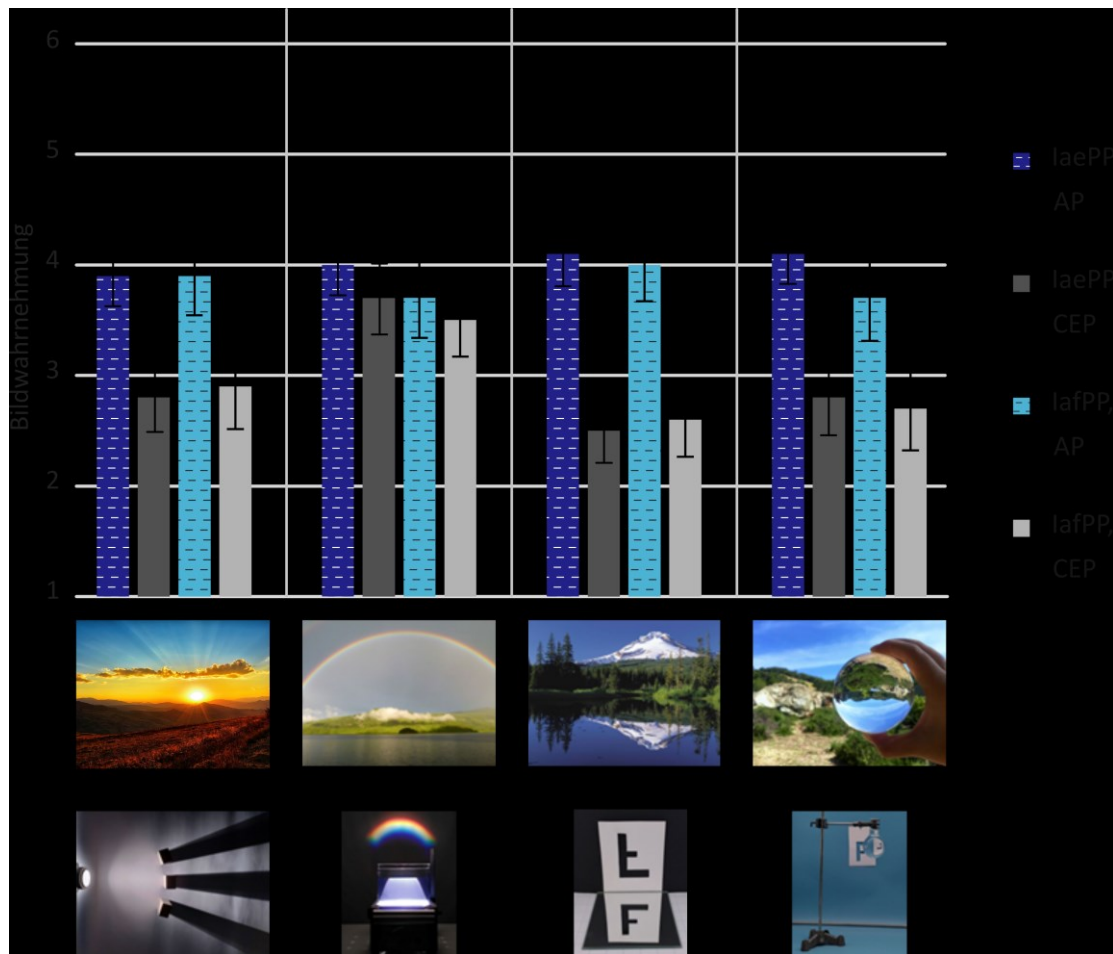


Abbildung 6.1: Mittelwerte, Standardabweichungen und Effektgrößen der ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung. In blau und gemustert sind die Mittelwerte der APs angezeigt, in grau und ohne Muster sind die Mittelwerte der CEPs. Die Abkürzungen stehen für: AP, "aesthetic picture"; CEP, "classroom experiment picture"; laePP, "instrument for aesthetic perception of pictures"; lafPP, "instrument for affective perception of pictures". Bildnachweise zu den Fotos: siehe Tabelle 4.2.

Nach diesen ersten Analysen wurden umfassendere statistische Tests nach Field et al. (2012) durchgeführt. Hier wurden robuste parametrische Analysen gewählt. Zusätzlich werden die Ergebnisse mittels nicht-parametrischer Analysen überprüft, da nach den Analysen in Kapitel 5.1.1 für die Items keine Normalität für alle Subskalen nachgewiesen werden kann. Des Weiteren wird mit einer robusten, gemischten zweifaktoriellen Varianzanalyse der Einfluss der Bildkategorie (AP oder CEP) und des Themenbereichs (Lichtausbreitung, Spektrum, Reflexion, Brechung) auf die abhängige Variable (laePP und lafPP) untersucht.

Die robusten, gemischten zweifaktoriellen Varianzanalysen zeigen signifikante Haupteffekte sowohl der Bildkategorie (AP vs. CEP) als auch des Themenbereiches (Lichtausbreitung, Spektrum, Reflexion, Brechung). Dabei ist der Effekt der Bildkategorie höher (F -Werte für laePP: $F(1, 108) = 65,55$, $p < 0,05$; lafPP: $F(1, 108) = 62,71$, $p < 0,05$) als der Effekt des Themenbereichs (F -Werte für laePP: $F(3, 324) = 6,85$, $p < 0,05$; lafPP: $F(3, 324) = 4,01$, $p < 0,05$). Zudem werden signifikante Interaktionseffekte zwischen der Bildkategorie und dem Themenbereich festgestellt (laePP: $F(3, 324) = 10,38$, $p < 0,05$; lafPP: $F(3, 324) = 7,54$, $p < 0,05$).

Aufgrund des signifikanten Einflusses des Themenbereichs werden für jedes Bildthema zusätzliche Analysen mit dem Welch-Test nach Field et al. (2012) durchgeführt. Dieser ist im R-Paket „effectsize“ (R Core Team, 2022) implementiert. Daraufhin folgt eine nicht-parametrische Analyse mit dem Wilcoxon-Rangsummentest mit Kontinuitätskorrektur nach Field et al. (2012), um die Gültigkeit der Analysen für nicht-normalverteilte Daten zu bestätigen. Der Wilcoxon-Rangsummentest und die zugehörigen Effektstärken r wurden mit den Paket „stats“ sowie "DSUR.noof" (Maria Aufheimer, 2024; R Core Team, 2022) durchgeführt. Für alle Themenbereiche außer „Spektrum“ ergeben Welch-Tests ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen APs und CEPs. Die zugehörigen Teststatistiken und Effektgrößen sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. Die Werte der Effektgrößen aus dem nicht-parametrischen Wilcoxon-Rangsummentest weichen weniger als 10% von den mit parametrischen Tests berechneten Werten ab, siehe Tabelle 6.1.

Tabelle 6.1: Statistiken zu den laePP und lafPP für beide Bilder AP und CEPs: Skalenmittelwerte und Standardabweichungen. T-Statistik aus dem Parametrischen Welch-test, Effektstärken nach Cohen. Außerdem aus dem Wilcoxon-Rangsummentest W-Statistik, p-Werte, z-Score, daraus errechnete r und Effektstärke d den zwischen APs und CEPs.

Themenbereich	Subskala	AP	CEP	Welch -Test			Effekt mit 95% CI	Wilcoxon-Rangsummentest				
		$M [SD]$		t	df	p		W	p	Z	r	d
Lichtausbreitung	laePP	3,9 [1,0]	2,8 [1,1]	5,52	108	0,00	1,05 [0,65 – 1,45]	2361	0,00	- 5,07	0,48	1,11
	lafPP	3,9 [0,8]	2,9 [1,1]	5,47	101	0,00	1,04 [0,64 – 1,44]	2329	0,00	- 4,89	0,47	1,05
Spektrum	laePP	4,0 [1,0]	3,7 [1,2]	1,32	106	0,09	0,25 [-0,12 – 0,63]	1767	0,13	- 1,52	0,14	ns
	lafPP	3,7 [1,2]	3,5 [0,8]	1,08	98	0,14	0,21 [-0,17 – 0,58]	1792	0,10	- 1,67	0,16	ns
Reflexion	laePP	4,1 [1,1]	2,5 [1,1]	7,49	107	0,00	1,56 [1,13 – 1,99]	2641	0,00	- 6,75	0,64	1,68
	lafPP	4,0 [1,0]	2,6 [1,0]	7,74	108	0,00	1,48 [1,05 – 1,90]	2606	0,00	- 6,54	0,62	1,60
Brechung	laePP	4,1 [1,0]	2,8 [1,2]	6,23	103	0,00	1,19 [0,78 – 1,60]	2432	0,00	- 0,50	0,52	1,23
	lafPP	3,7 [1,2]	2,7 [1,1]	4,46	108	0,00	0,85 [0,46 – 1,24]	2248	0,00	- 4,40	0,42	0,92

6.2 Erkenntnisse aus der Interviewstudie zur subjektiven visuellen Ästhetik

Mit der Interviewstudie sollen die Gründe der Entscheidungsfindung bei der Bewertung von Bildern beleuchtet werden. Die Interviewstudie ergänzt damit die Aussagekraft der Ergebnisse der Schulstudie hinsichtlich der ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung. Die Ergebnisse der Befragung der Schülerinnen und Schüler werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

6.2.1 Wahl des besten Bildes

Die Frage nach der Wahl des besten Bildes beantworteten und begründeten sowohl Interviewprobanden ($N = 18$) als auch ein Teil der Probanden der Schulstudie ($N = 62$). Dabei hatten alle Interviewprobanden alle acht Bilder zur Wahl, während die Probanden der Schulstudie jeweils nur vier Bilder, zwei APs und zwei CEPs, zur Auswahl hatten. Die Antworten beider Studien sind in Abbildung 6.2 visualisiert. Insgesamt werden in beiden Gruppen vorrangig APs als beste Bilder gewählt. Bei der Interviewstudie werden ausschließlich APs zu den besten Bildern gewählt, während bei der Schulstudie acht Mal das CEP zum Themenbereich Spektrum als bestes Bild gewählt wurde. Beim Themenbereich Spektrum gibt es weitere Unterschiede zwischen den Gruppen: Dieses AP wird von den Interviewprobanden überhaupt nicht gewählt.

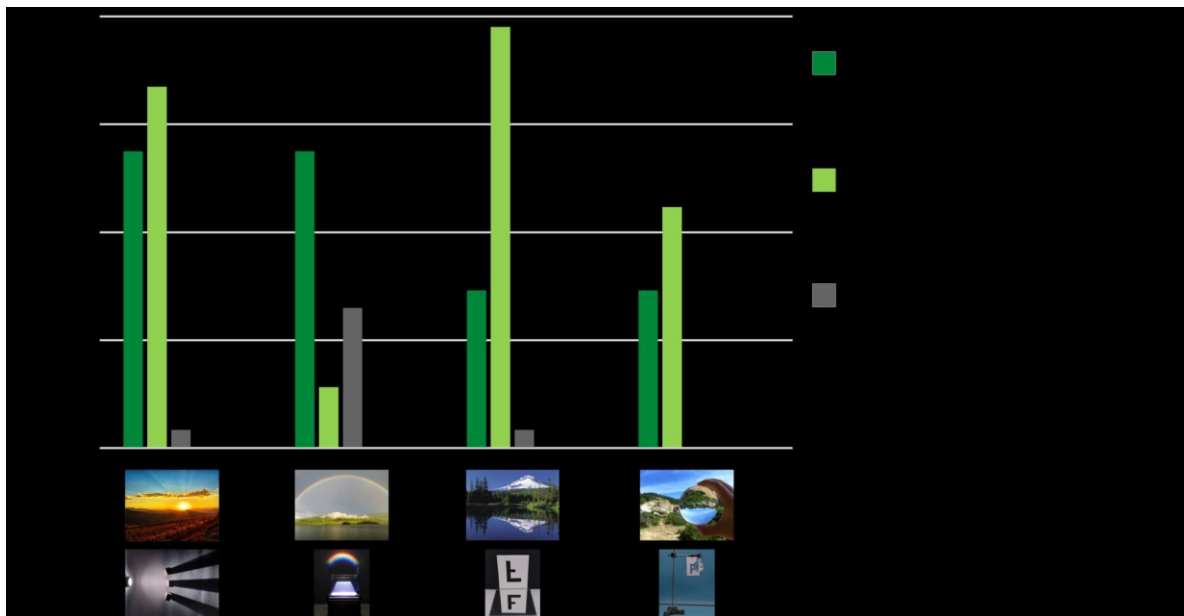


Abbildung 6.2: Wahl des besten Bildes in der Schulstudie sowie der Interviewstudie. In grün sind die Anzahl der Nennungen der APs, in grau die Anzahl der Nennungen der CEPs. Dunkel steht für die Schulstudie, hell für die Interviewstudie. Bildnachweise zu den Fotos: siehe Tabelle 4.2.

Diese Auffälligkeit beim Themenbereich Spektrum könnte eine Folge der unterschiedlichen Anzahl der Bilder sein, die zur Auswahl standen. Interviewprobanden hatten die Wahl zwischen insgesamt acht Bildern, je vier pro Bildkategorie. Probanden der Schulstudie standen im Rahmen des Crossover-Designs nur je zwei APs und CEPs zur Wahl.

6.2.2 Begründungen zur Wahl des besten Bildes

Neben der Auswahl des besten Bildes gaben die Probanden auch eine Begründung dieser Wahl. Einen visuellen Überblick für die Begriffe, die die Befragten mit den Bildern assoziieren, liefern sogenannte „Wordclouds“. In der Didaktik und Psychologie sind Wortwolken ein geläufiges Werkzeug (Deeva et al., 2021; McNaught & Lam, 2010). Mit Wortwolken können häufig erwähnte Wörter eines Textes, z.B. der Niederschrift eines Interviews, visuell hervorgehoben werden (McNaught & Lam, 2010). Wortwolken können relativ einfach mit entsprechenden Webseiten generiert werden. Das bringt allerdings den Nachteil einer geringen Kontrolle über Größe, Farbe und Anordnung der Wörter mit sich. Daher wurden die folgenden Wortwolken mithilfe des Zeichenprogramms Inkscape (Inkscape Developers, 2022) eigenhändig erstellt. Für die Erstellung einer Wortwolke werden zunächst häufige genannte Begriffe bzw. Wörter extrahiert. Diese Wörter werden auf eine Zeichenfläche gesetzt. Wörter, die häufiger genannt werden, erhalten eine größere Schriftgröße. Dabei entspricht eine doppelt so häufige Anzahl an Nennungen in etwa einer doppelt so großen Schriftgröße. Für eine visuell ansprechende Darstellung werden einige Wörter leicht in verschiedene Richtungen gedreht und kompakt angeordnet. Zusätzlich sind Wörter mit wenigen bestimmten Farben gefärbt, wobei die Farben nicht zwangsläufig eine bestimmte Zuordnung haben. Bei dem gesamten Vorgang wird den Kriterien zum ästhetischen Design gefolgt. Zusätzlich zu den Interviewfragen konnte auch mit den Antworten aus der Schulstudie eine entsprechende Wortwolke erstellt werden.

Aus den Stichworten zur Begründung der Wahl der Interviewprobanden konnten zwölf Schlüsselwörter extrahiert werden. Diese bilden die Basis der Wortwolke, siehe Abbildung 6.3 a). Darüber hinaus gaben 62 Teilnehmer aus der Schulstudie ebenfalls eine Begründung zu der Frage nach dem besten Bild. Diese Antworten sind die Basis der Wortwolke in Abbildung 6.3 b). In beiden Wortwolken sind Wörter, die ausschließlich von Interview- bzw. Schulstudien-Probanden genannt wurden, blau bzw. pink gefärbt.

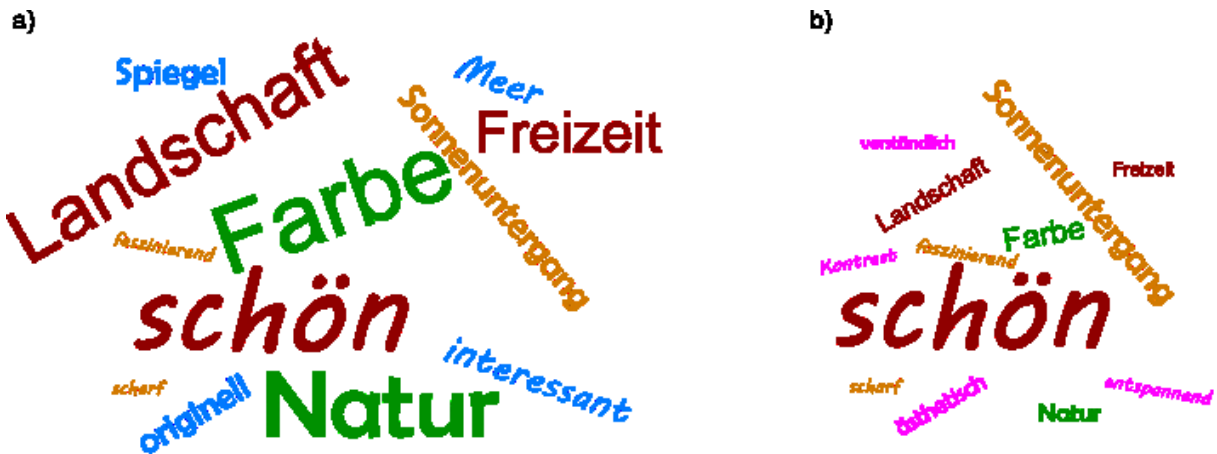


Abbildung 6.3: Wortwolken zur Frage nach dem Begründung, warum ein selbst gewähltes Bild das beste Bild ist. a) visualisiert Antworten aus der Interviewstudie. b) visualisiert zum Vergleich Antworten aus der Schulstudie.

Die in den Interviews genannten Begründungen zur Bildauswahl konnten in zwei Merkmalsbereiche gruppiert werden. Der eine Merkmalsbereich lässt sich als „allgemeines Schönheitsempfinden“ bezeichnen. Er umfasst Nennungen von Bildeigenschaften wie „Farbe“ und „Kontrast“. Diese entsprechen Kriterien in Leders Modell. Die häufig genannte Empfindung „schön“ wird ebenfalls diesem Merkmalsbereich zugeordnet. Der andere Merkmalsbereich lässt sich als „inhaltsbezogene Merkmale“ bezeichnen. Er umfasst Begriffe wie „Sonnenuntergang“ oder „Landschaft“. Sie beziehen sich auf den Inhalt sowie den Kontext der Bilder. Selbst wenn die Anzahl der Probanden in der Interviewstudie nicht für eine statistisch fundierte Untersuchung geeignet ist, so ergeben die Daten durch Mehrfachantworten genug Antworten für ein quantitatives Histogramm in Abbildung 6.4. Für die Histogramme wurde erfasst, wie viele Antworten zu den beiden Merkmalsbereichen zugeordnet werden konnten. Antworten wie „Keine Ahnung“ konnten keinem der beiden Merkmalsbereiche zugeordnet werden und wurden daher unter „Sonstiges“ kategorisiert. Das Histogramm zeigt, dass die Antworten in ähnlicher Häufigkeit den beiden Merkmalsbereichen zugeordnet werden konnten. Insbesondere lassen sich die Antworten häufiger zu einem der beiden Merkmalsbereiche zuordnen, als dass sie unter „Sonstiges“ fallen.

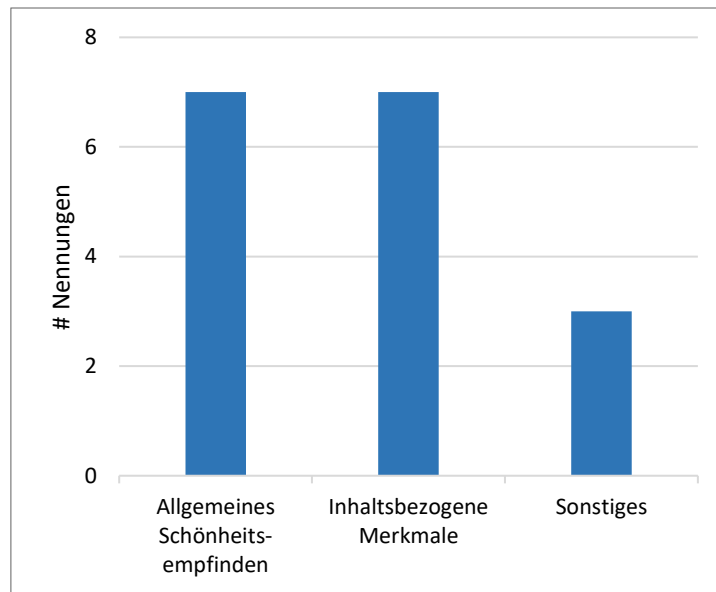


Abbildung 6.4: Histogramm zur Anzahl der Nennungen in den zwei Kategorien für Gründe zum Gefallen am Bild.

Zusätzlich wurden die Teilnehmer der Interviews gefragt, welche Inhalte sie in den Bildern erkennen, siehe Anhang in Kapitel A.4. Alle Probanden erkannten die physikalischen Phänomene richtig. Zwei Probanden bemerkten, dass es einfacher sein könnte, das physikalische Phänomen in den CEPs zu erkennen. Als Grund argumentieren sie, dass die CEPs weniger komplex oder weniger ablenkend sind. Nach dem Interview wurden die Bilder auf ihre Rückseite gedreht, auf der nur weiß zu sehen war. Auf die Frage, wo man im Alltag einem der vier Phänomene begegnen kann, wurden jedoch selten die Kontexte genannt, die in den Bildern abgebildet sind. Ein kurzes Interview, bei dem sich Probanden nicht mit den physikalischen Phänomenen der Bilder auseinandersetzen, reicht also nicht aus, um eine hohe Aktualisierungsstärke der Kontexte zu erreichen.

6.3 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse zur subjektiven visuellen Ästhetik

Dekorative Bilder wurden in früheren Studien als nicht lehrreich oder sogar als kognitive Belastung angesehen (Rey, 2012; Schneider et al., 2016). Neuere Studien deuten jedoch darauf hin, dass „eingebundene“ dekorative Bilder, die visuell ansprechend und zusätzlich kontextuell relevant sind, die Stimmung und Aufmerksamkeit verbessern können, ohne das Lernen zu beeinträchtigen (Lenzner et al., 2013; Lindner, 2020). In dieser Arbeit wurde die Kombination von dekorativen und instruktionalen Funktionen von Bildern untersucht. Hierfür wurden zunächst aus der Literatur abgeleitete Kriterien für die visuelle Ästhetik formuliert. Das Modell von Leder (2004) und nachfolgende Studien erwiesen sich als erfolgversprechende Grundlage. Darüber hinaus wurden Aspekte aus der Physikdidaktik berücksichtigt. Die zusammengestellten Kriterien lassen sich in zwei Gruppen einteilen: ästhetische Kriterien wie Farbe und Kontrast sowie kontextbezogene Kriterien wie Inhalt und Kontext. Anhand dieser Kriterien wurden vier ästhetische Bilder (APs) ausgewählt, die als Grundlage für die Erstellung und Durchführung einer Schulstudie und einer Interviewstudie dienen.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage 1 wurde in der Schulstudie die ästhetische und affektive Wahrnehmung der ausgewählten Bilder ermittelt. Dazu wurde das in Kapitel 4.2.5 entwickelte und in Kapitel 5.1 validierte Instrument zur Messung der ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung, IaePP und IafPP, eingesetzt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die APs als ästhetischer wahrgenommen wurden als die Bilder von Experimenten in einem Klassenzimmer (CEPs). Im Allgemeinen waren die Skalenmittelwerte der subjektiven Bewertungen der APs signifikant höher. Die hohen Effektstärken unterstützten diese Beobachtung. Eine nahe liegende Vermutung ist, dass dieser Effekt auf Unterschiede in der ästhetischen Wahrnehmung zurückzuführen ist. Dies deutet darauf hin, dass sich mit den zusammengestellten Kriterien effektiv ästhetisch wahrgenommene Bilder für den Einsatz im Physikunterricht auswählen lassen.

Der einzige Ausreißer in dieser Studie ist das Bildpaar zum Themenbereich Spektrum. Die Skalenmittelwerte beider Subskalen des CEPs waren annähernd so hoch wie die Skalenmittelwerte der APs. Dabei lag die Bewertung des APs im Bereich der Standardabweichungen der APs der anderen Themenbereiche. Jedoch war die Bewertung dieses speziellen CEPs höher als die Bewertung der anderen CEPs. Ein möglicher Grund könnten die Farben sein, die notwendigerweise mit dem Bildthema „Spektrum“ verbunden sind. Durch die Farbigkeit des CEPs könnte das Bild als ästhetisch empfunden werden.

Somit unterstützen die Daten die Hypothese 1, d.h. dass Schülerinnen und Schüler die ausgewählten ästhetischen Bilder hinsichtlich ästhetischer und affektiver Bildwahrnehmung besser bewerten als die Bilder von Experimenten in Klassenzimmern.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage 2, der Untersuchung der Begründungen für die Bildwahrnehmung, wurde eine kurze Interviewstudie mit den APs und den dazugehörigen CEPs durchgeführt. Die Antworten der Schülerinnen und Schüler ließen sich in ästhetische und inhaltsbezogene Kategorien einteilen. Dies führt zu dem Schluss, dass der Ausgangsansatz der Berücksichtigung visueller, ästhetischer als auch inhaltlicher bzw. kontextueller Kriterien für ein Gefallen oder Nichtgefallen eines Bildes ausschlaggebend sind. Eine mögliche Einschränkung der Interviewstudie ist die geringe Stichprobengröße von 18 Teilnehmern, jedoch waren die gewonnenen Erkenntnisse konsistent.

Die Ergebnisse zu den Forschungsfragen 1 und 2 stimmen mit den Beobachtungen von Moshagen und Thielsch (2010) überein, die in einer Interviewstudie die visuelle Komplexität und die Farbe als die beiden wichtigsten Aspekte ästhetischer Webseiten bezeichneten. Wie auch von Halonen (2014), Deng et al. (2017) und Joye et al. (2013) festgestellt, konnte in dieser Arbeit bestätigt werden, dass Farbe ein wichtiger Prädiktor für von Schülerinnen und Schülern wahrgenommene visuelle Ästhetik ist.

Weitere Einsichten zum Kontext ergaben, dass der Kontext eng mit der Ästhetik verknüpft ist (Joye et al., 2013). Darüber hinaus stellte Muckenfuß (1995) fest, dass ein interessanter Kontext den Inhalt situiert und somit einen Rahmen für die Lernenden bietet. Die vorliegende Arbeit legt nahe, dass die Natur in der Tat ein solcher interessanter Kontext ist.

Insgesamt konnte in diesem Kapitel nachgewiesen werden, dass Schülerinnen und Schüler die APs als ästhetischer wahrnehmen als die CEPs. Im Rahmen dieser Arbeit konnte somit die Relevanz sowohl rein ästhetischer als auch inhaltsbezogener Kriterien aufgezeigt werden.

7 Ergebnisse zum Lernen mit ästhetischen Bildern

Im Folgenden werden die Ergebnisse bezüglich der Forschungsfragen 3 und 4, die den Lernfortschritt mit APs untersuchen, präsentiert. Es ist anzumerken, dass aufgrund der kurzen Interventionszeit keine signifikanten Lerneffekte im konzeptionellen Wissensbereich zu erwarten sind. Dennoch wurde eine explorative Datenanalyse durchgeführt, um potenziell unterschiedliche Einblicke der Schülerinnen und Schüler zu erkennen. Hierfür wurde der in Kapitel 4.2.5 vorgestellte und in Kapitel 5.2 aufbereitete Wissenstest für Optik eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Prä- und Posttests werden in Kapitel 7.1 dargestellt. Da keine eindeutigen Ergebnisse vorliegen, wird in Kapitel 7.2 eine Analyse der Antworten in der Lernumgebung durchgeführt. Dazu wird in Kapitel 7.2.1 die fachliche Bearbeitung der Lernumgebung genauer untersucht und in Kapitel 7.2.2 die Ergebnisse der Bearbeitungszeit präsentiert. Die Beantwortungen der Forschungsfragen 3 und 4 werden in Kapitel 7.2.1 diskutiert. Die ursprünglich zur weiteren Analyse des Lernzuwachses erhobene Prädiktorvariablen werden Kapitel 7.3 behandelt. Auch ihr Einfluss auf die wahrgenommene visuelle Bildästhetik wird untersucht.

7.1 Erkenntnisse aus dem Wissenstest

Zur Beantwortung der Forschungsfrage 3 wurde der Lernzuwachs nach der Intervention anhand der Differenzen in den erreichten Punktzahlen zwischen den Prä- und Postversionen des Wissenstests untersucht. Zunächst wurden die Mittelwerte mit Standardfehlern aus allen erreichten Punkten im Prätest und im Posttest gebildet, siehe Abbildung 7.1. Die Verteilung ist in einem Violinendiagramm im Anhang in Kapitel A.2.6 zu finden. Es wird deutlich, dass der Posttest keine signifikante Verbesserung gegenüber dem Prätest zeigt. Auch ein statistischer Vergleich bestätigt, dass insgesamt kein Lernzuwachs erzielt wurde.

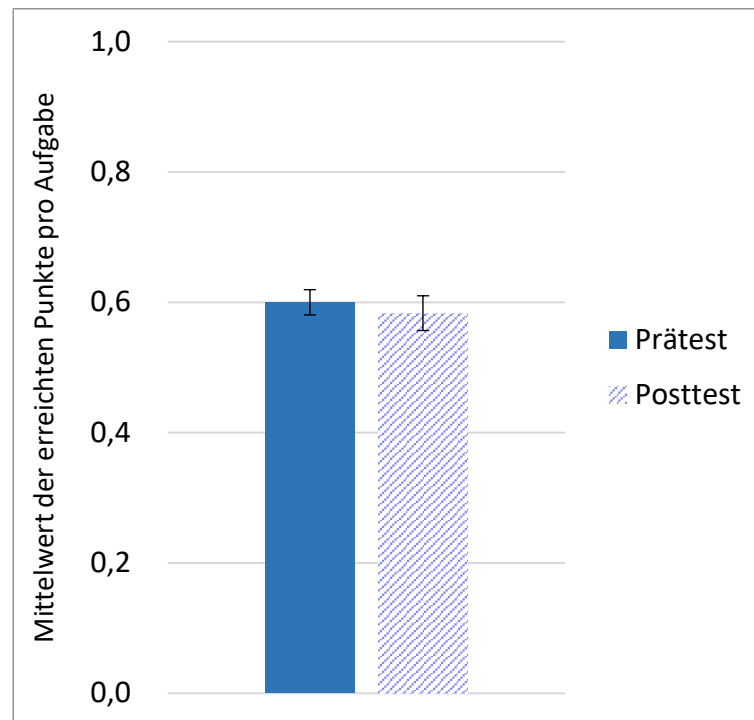


Abbildung 7.1: Mittelwerte der erreichten Punkte der Schülerinnen und Schülern in den Wissenstests. Hier kann kein signifikanter Unterschied zwischen den erreichten Punkten im Prä- und Posttest festgestellt werden.

Die Aufteilung der Items in die verschiedenen Themenbereiche erlaubt es jedoch, die Unterschiede zwischen Prä- und Posttest genauer zu untersuchen. Zunächst wird geprüft, ob Unterschiede zwischen den einzelnen Klassen bestehen. Als nächstes werden die erreichten Punkte in den Wissenstests themenabhängig dargestellt. Zudem wird geprüft, inwiefern die Untersuchungsgruppen sich insgesamt unterscheiden. Abschließend werden statistischen Kenngrößen der einzelnen Items aufgeschlüsselt, visualisiert und auffällige Eigenschaften der erreichten Punktzahlen bei einzelnen Items untersucht.

Wissenszuwachs in den Untersuchungsgruppen

Die Aufschlüsselung des Wissenszuwachs nach Untersuchungsgruppe ist in Tabelle 7.1 gelistet. Zusätzlich kann mit den Histogrammen in Abbildung 7.2 der Unterschied der erreichten Punkte im Posttest zwischen den Untersuchungsgruppen verglichen werden. Für die statistische Untersuchung wurden dazu Effektstärken d nach Cohen (1988) ausgerechnet, siehe Tabelle 7.1. Die Effektstärken legen nahe, dass der Lerneffekt in beiden Untersuchungsgruppen gleich ist. Hier gibt es wieder eine Ausnahme beim Themenbereich Spektrum mit einer kleinen Effektstärke. Insgesamt lässt sich folgern, dass keine Untersuchungsgruppe in einem Themenbereich stärker lernt als die andere Untersuchungsgruppe.

Tabelle 7.1: Analyse der erreichten Punkte im Wissenstest unterteilt in die vier Themenbereiche. $N_{G1}=55$, $N_{G2}=54$. Effektstärken sind angegeben um zu prüfen, ob Gruppe AP oder Gruppe CEP jeweils zufällig besser abschneidet.

Themenbereich	Gruppe	Prätest		Posttest		Effektstärke d der Differenz der Posttests
		M	SD	M	SD	
Lichtausbreitung	AP, G1	0,56	0,28	0,52	0,19	0,28
	CEP, G2	0,63	0,20	0,57	0,16	[-0,09 -0,66]
Spektrum	AP, G2	0,60	0,16	0,61	0,12	0,34
	CEP, G1	0,62	0,16	0,56	0,17	[-0,04 - 0,72]
Reflexion	AP, G1	0,63	0,23	0,58	0,20	0,19
	CEP, G2	0,66	0,34	0,62	0,22	[-0,18 - 0,56]
Brechung	AP, G2	0,45	0,21	0,51	0,11	0
	CEP, G1	0,46	0,11	0,51	0,15	[-0,37 - 0,37]

Wissenszuwachs in den einzelnen Themenbereichen

Im Folgenden wird weitergehend untersucht, ob Schülerinnen und Schüler bei einzelnen Themenbereichen, insbesondere beim Lernen mit APs einen signifikanten Wissenszuwachs haben. Dazu werden zunächst die Differenzen der Mittelwerte beim Prä- und Posttest der einzelnen Items der Themenbereiche für AP und CEP getrennt visualisiert, siehe Abbildung 7.2, sowie Tabelle 7.1. Hier ist jedoch nur beim Themenbereich Brechung auffällig, dass die Mittelwerte im Posttest deutlich höher sind als die Mittelwerte beim Prätest. Somit haben Probanden lediglich beim Themenbereich Brechung bessere Ergebnisse im Posttest erzielt. Dies trifft gleichermaßen auf beide Untersuchungsgruppen zu. Diese Beobachtung hat sich bereits in Tabelle 5.7 in Kapitel 5.2 angedeutet, in der entsprechende Items grün markiert wurden.

Wissenszuwachs bei einzelnen Items

Da es insgesamt bei den Themenbereichen keinen Lernzuwachs abhängig von der Themenbereichen gab, wird im Folgenden explorativ untersucht, ob es bei einzelnen Fragen einen Lernzuwachs gibt, bzw. ob bestimmte Fragen im Posttest zu einem größeren Anteil als im Prätest richtig beantwortet wurden. Dazu wurde der Anteil an richtigen Antworten für die jeweiligen Items im Prä- und Posttest verglichen. Das Ergebnis visualisiert ebenfalls Abbildung 7.2. Es zeigt sich, dass Items mit der größten positiven Differenz gleichzeitig eine hohe Itemschwierigkeit im Prätest aufweisen. Dagegen treten negative große Differenzen vor allem bei Items auf, die im Prätest eine geringe Itemschwierigkeit aufweisen. Diese Ergebnisse sind nachvollziehbar, da leichte Items rein statistisch im Posttest eine größere Wahrscheinlichkeit haben, weniger oft richtig beantwortet zu werden. Genauso werden Items, die im Prätest schwer sind, statistisch öfter beim Posttest richtig beantwortet. Tatsächlich sind gerade Items

mit hoher Schwierigkeit dabei, deren Inhalt in der Lernumgebung adressiert wurde. Es wurde daher weiterhin untersucht, ob dieser Zusammenhang statistisch nachweisbar bzw. insgesamt sichtbar ist.

Unterschiede zwischen den einzelnen Schulklassen

Die Tabelle 7.2 zeigt die normierten Mittelwerte der erreichten Punkte aufgeschlüsselt nach der Klasse. Hier wird deutlich, dass in keiner Klasse ein signifikanter Wissenszuwachs erreicht wurde. Auffällig ist, dass die Standardabweichungen aller Klassen nicht groß sind, was für eine Homogenität innerhalb der Klassen spricht. Für die Klassenhomogenität spricht auch, dass das generelle Niveau der zwischen verschiedenen Klassen größere Unterschiede aufweist, als zwischen den Prä- und Posttests der einzelnen Klassen. Am besten abgeschnitten hat die Klasse am Gymnasium Tegernsee, am schlechtesten abgeschnitten haben die Schülerinnen und Schüler der Realschule. Das gute Abschneiden der Klasse am Gymnasium Tegernsee lässt sich damit erklären, dass die Klasse eine Klassenarbeit zum Lernbereich Optik in derselben Woche geschrieben hatte, in der die Studie durchgeführt wurde. Das relativ dazu schlechte Abschneiden der Realschule lässt sich damit erklären, dass an Realschulen Inhalte der Optik weniger vertieft gelehrt werden als an Gymnasien. Insgesamt erreichen die einzelnen Klassen beim Posttest nicht signifikant mehr Punkte als beim Prätest.

Tabelle 7.2: Erreichte Punkte beim Wissenstest aufgeschlüsselt nach den einzelnen Klassen und Testzeitpunkte.

Schule	N	Testzeitpunkt	M	SD	Lernzuwachs
Gymnasium Tegernsee	22	Prätest	0,66	0,08	Weniger Punkte, innerhalb der Standardabweichung gleich
		Posttest	0,64	0,12	
Käthe-Kollwitz-Gymnasium	29	Prätest	0,54	0,09	Weniger Punkte, innerhalb der Standardabweichung gleich
		Posttest	0,48	0,12	
Kurt-Huber-Gymnasium	17	Prätest	0,60	0,07	Weniger Punkte, innerhalb der Standardabweichung gleich
		Posttest	0,59	0,09	
Helene-Keller-Realschule	21	Prätest	0,48	0,13	Gleich viele erreichte Punkte
		Posttest	0,48	0,12	
Wilhelms-gymnasium	20	Prätest	0,61	0,06	Mehr Punkte, innerhalb der Standardabweichung gleich
		Posttest	0,62	0,07	

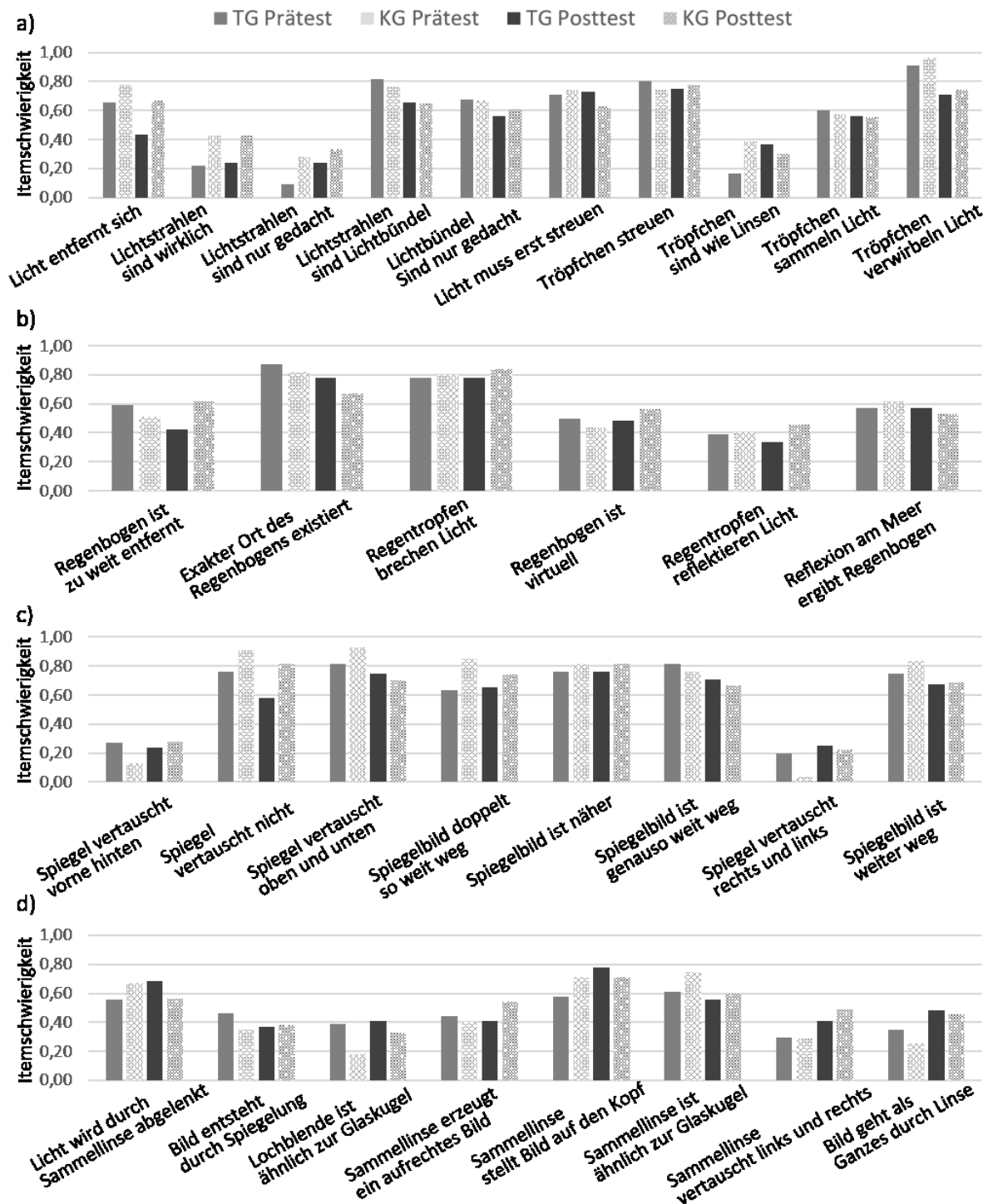


Abbildung 7.2: Itemschwierigkeit bzw. Anteil der richtigen Antworten bei den Items des Wissenstests zu den Themenbereichen a) Lichtausbreitung, b) Spektrum, c) Reflexion und d) Brechung. Itemschwierigkeiten bei Themenbereichen mit APs sind einfarbig, Itemschwierigkeiten bei CEPs sind gemustert.

7.2 Erkenntnisse aus der Lernumgebung

Beim Wissenstest Optik konnte insgesamt kein Lernzuwachs festgestellt werden. Daher wird untersucht, ob die Schülerinnen und Schüler während des Bearbeitens der Lernumgebung die Lernaufgaben besser lösen, wenn sie mit APs arbeiten. Dazu wurden in Kapitel 5.5 die Bewertung mit dem Verfahren zur Interraterreliabilität erläutert.

7.2.1 Ergebnisse zur fachlichen Bewertung der Lernumgebung

Die Tabelle 7.3 bietet eine Übersicht über die Leistungen der Schülerinnen und Schüler bei den Lernaufgaben der Lernumgebung. Dabei werden die Mittelwerte der erreichten Punkte für alle Probanden sowie die Mittelwerte der jeweiligen Bildkategorien in den verschiedenen Themenbereichen dargestellt. Zur leichten Vergleichbarkeit der beiden Untersuchungsgruppen wurden diese farblich gekennzeichnet: Untersuchungsgruppe G1 in Grau und Untersuchungsgruppe G2 in Gelb. Zusätzlich ist die maximal erreichbare Punktzahl für jeden Themenbereich angegeben. Es zeigt sich, dass keine der Untersuchungsgruppen grundsätzlich besser abschneidet. Zudem zeigt sich, dass die Lernaufgaben zu den APs innerhalb der Standardabweichung nicht besser beantwortet werden als die Lernaufgaben zu den CEPs.

Tabelle 7.3: Die Tabelle zeigt die maximal erreichbare Punktzahl bei den Lernaufgaben in dem jeweiligen Themenbereich sowie Mittelwerte und Standardabweichungen der erreichten Punkte. Gruppe 1 ist grau gekennzeichnet, N = 58; Gruppe 2 ist gelb gekennzeichnet, N = 53.

	Gruppe	Lichtausbreitung		Spektrum		Reflexion		Brechung	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Maximale Punktzahl		20		9		15		11	
M und SD der Lernaufgaben	alle	11,2	0,8	6,7	0,6	9,4	0,8	5,5	1,1
	AP	10,6	0,8	6,5	0,6	9,9	0,8	5,4	1,2
	CEP	11,7	0,8	7,0	0,6	8,9	0,8	5,5	1,1

Insgesamt wird auch mit diesen Ergebnissen deutlich, dass trotz Aufschlüsselung der Schülerantworten in die unterschiedlichen Themenbereiche die Analyse keine signifikanten Leistungsunterschiede aufzeigt. Dies legt nahe, dass bei dieser Studie weder die Gruppenzugehörigkeit noch die Bildkategorie einen entscheidenden Einfluss auf das Abschneiden der Schülerinnen und Schüler bei den Lernaufgaben hatte.

7.2.2 Ergebnisse zur Bearbeitungszeit

Im Folgenden wird der Forschungsfrage 4 mit den dazugehörigen zwei Hypothesen nachgegangen. Für die Zeitanalyse wurden für jeden Themenbereich eine Grafik erstellt, siehe Abbildung 7.3. Die Balken zeigen die Mittelwerte der Zeitspannen für die jeweilige Aufgabe, aufgeschlüsselt nach AP und CEP. Es lässt sich nicht feststellen, dass das Arbeiten mit APs oder CEPs generell zu einer kürzeren oder längeren Bearbeitungszeit führt. Zudem sind die Standardabweichungen der Zeitspannen im Verhältnis zu den Differenzen der Mittelwerte der Zeitspannen hoch, sodass keine signifikanten Unterschiede zu erwartet sind. Dennoch lohnt sich eine detaillierte Untersuchung der einzelnen Themenbereiche.

Beim Themenbereich Lichtausbreitung werden die Lernaufgaben im Durchschnitt in 40 s bis 100 s bearbeitet. Auffällig ist, dass bei den Lernaufgaben, bei denen die Gruppe mit dem AP mehr Zeit benötigte, auch die Probanden mit dem CEP länger benötigen. Am meisten Zeit wird bei der „Drag und Drop“ Aufgabe zu Objekten für die Schattenentstehung im jeweiligen Bild sowie bei der Aufgabe zur Schattenentstehung im zweiten Bild benötigt.

Beim Themenbereich Spektrum sind die Zeitspannen zur Beantwortung der Fragen insgesamt kürzer als im Themenbereich Lichtausbreitung. Interessanterweise liegen hier die Zeitspannen der Lernaufgaben mit dem CEP durchweg über denen der Lernaufgaben mit den APs.

Beim Themenbereich Reflexion sind bei den vier Fragen zum ersten Bild die Zeitspannen der Probanden mit CEPs länger als bei denen mit APs. Ab dem zweiten Bild kehrt sich dieser Trend um und die Probanden mit APs benötigen mehr Zeit.

Beim Themenbereich Brechung zeigt sich kein Trend in den Zeitspannen zwischen der Lernaufgaben mit APs und CEPs. Allerdings ist bemerkenswert, dass die zweite Lernaufgabe, die den Arbeitsauftrag der ersten Aufgabe auf das zweite Bild anwendet, in beiden Bildkategorien schneller bearbeitet wurde.

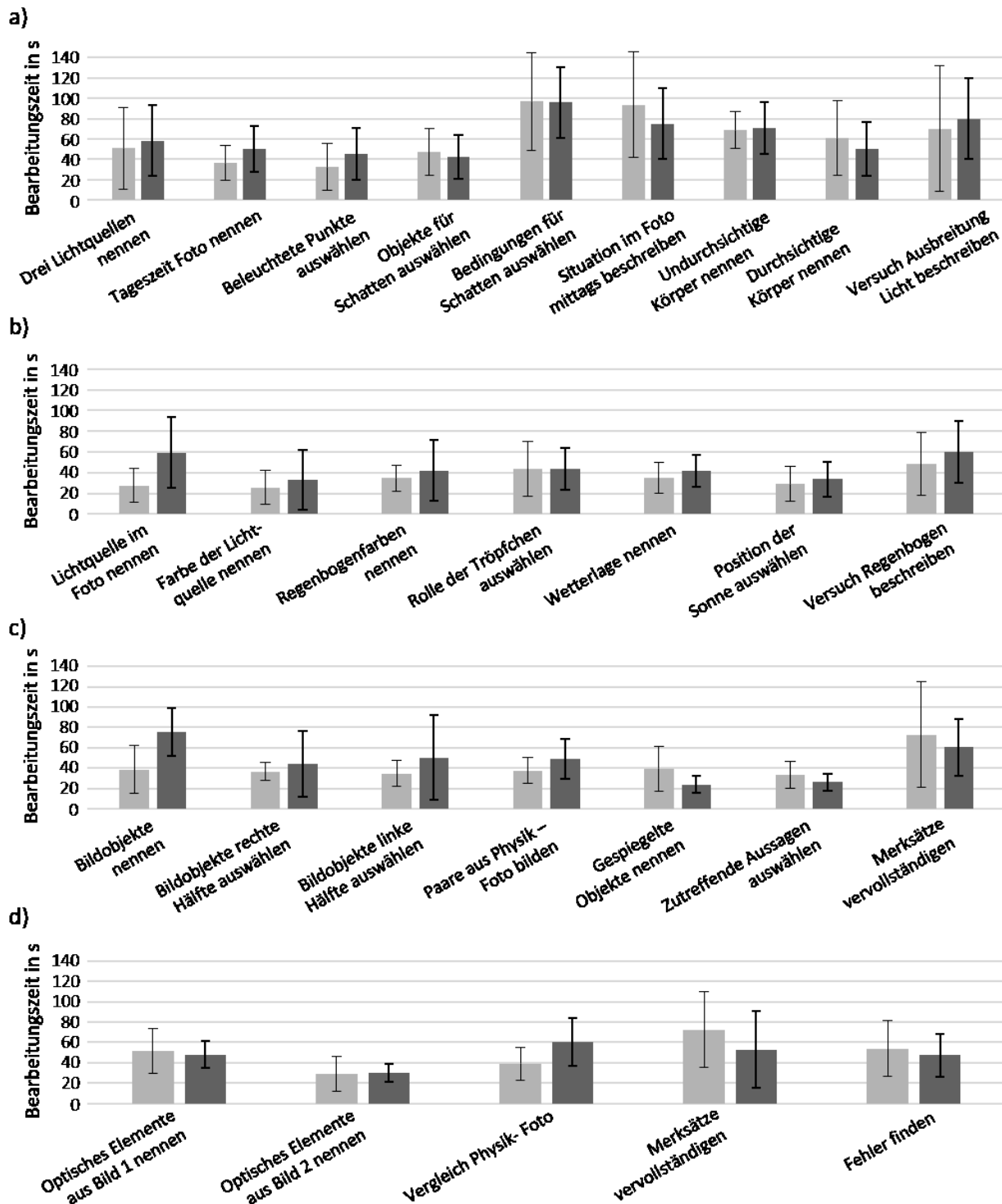


Abbildung 7.3: Bearbeitungszeit bei den unterschiedlichen Themenbereichen. In hell sind die Bearbeitungszeiten der Lernaufgaben mit APs, in dunkel mit CEPs: a) Lichtausbreitung, b) Spektrum, c) Reflexion, d) Brechung. Für alle Datensätze ist $N_{AP} = N_{CEP} = 11$.

7.3 Einfluss der Prädiktorvariablen

Die Einflüsse der Prädiktorvariablen Interesse an Physik, Interesse an der Fotografie und intrinsischer Motivation/Engagement sowie geschlechtsspezifische Effekte und die schulische Vertiefung bei der Bildbewertung wurden exploratorisch überprüft. Exploratorisch, weil die Effekte ursprünglich bezüglich des Lerneffekts untersucht werden sollten. Da kein Wissenszuwachs festgestellt werden konnte, sind solche Untersuchungen hinfällig. Allerdings kann der Einfluss der Prädiktorvariablen auf die Bildbewertung überprüft werden.

Prädiktorvariablen der Skalen zum Interesse

Mit Hilfe von Spearman's Rangkorrelationskoeffizienten wurde der Einfluss von intrinsischer Motivation/Engagement (IME), Interesse an Physik (I_Phys) und Interesse an Fotografie (I_Photo) nach Field et al. (2012) untersucht. Die Analyse ergab für alle Permutationen von Bildkategorien und Bildthemen keine signifikanten Korrelationen. Die einzigen statistisch signifikanten Korrelationen bestanden zwischen IME und I_Phys und der Bewertung der APs für die Subskala laePP: (IME: $\rho = 0,35$, 95% CI: [0,18, 0,41], $p < 0,001$; I_Phys: $\rho = 0,32$, 95% CI: [0,17, 0,43], $p < 0,001$). Effektstärken weisen allerdings nur schwache Effekte nach.

Prädiktorvariable Geschlecht

Die Auswirkungen von Geschlecht wurden explorativ analysiert. Dabei wurden Welch-Tests nach Field et al. (2012) durchgeführt, um zu untersuchen, ob das Geschlecht einen Einfluss auf die Bewertung der APs und der CEPs hat. Für APs bewerteten weibliche Teilnehmerinnen (laePP: $M = 4,23$, $SD = 0,74$, lafPP: $M = 4,01$, $SD = 0,87$) die Bilder signifikant höher als männliche Teilnehmer (laePP: $M = 3,77$, $SD = 1,24$, lafPP: $M = 3,63$, $SD = 1,16$), mit Testergebnissen von laePP: $t(173) = 3,32$, $p < 0,005$, lafPP: $t(199) = 2,80$, $p < 0,01$. Die mit Cohen's d (laePP: 0,45; [0,18 - 0,72], laefPP: 0,38; [0,11 - 0,65]) berechneten Werte der Effektgrößen zeigten jedoch nur einen kleinen Effekt. Es gab keinen signifikanten Unterschied in der Bewertung der CEPs zwischen weiblichen (laePP: $M = 2,98$, $SD = 1,13$, lafPP: $M = 3,01$, $SD = 1,01$) und männlichen (laePP: $M = 2,83$, $SD = 1,30$, lafPP: $M = 2,83$, $SD = 1,13$) Teilnehmern. Auch die mit Cohen's d (laePP: 0,13; [-0,14 - 0,39], laefPP: 0,17; [-0,10 - 0,43]) berechneten Werte der Effektgrößen zeigten einen vernachlässigbaren Effekt. Allerdings bewerteten insgesamt beide Geschlechter APs signifikant besser als CEPs.

Prädiktorvariable schulische Vertiefung

Auch die Auswirkungen des Schulzweiges wurden explorativ analysiert. Dabei wurden wieder Welch-Tests nach Field et al. (2012) durchgeführt, um zu untersuchen, ob das Teilnehmen am naturwissenschaftlichen Zweig einen Einfluss auf die Bewertung der APs und der CEPs hat. Für APs bewerteten Teilnehmer des naturwissenschaftlichen Zweiges (laePP: $M = 3,9$, $SD = 1,1$, lafPP: $M = 3,7$, $SD = 1,1$) die Bilder signifikant niedriger als Teilnehmer anderer Zweige (laePP: $M = 4,3$, $SD = 0,9$, lafPP:

$M = 4,1$, $SD = 0,9$), mit Testergebnissen von laePP: $t(168) = 3,04$, $p < 0,003$, lafPP: $t(173) = 3,02$, $p < 0,003$. Die mit Cohen's d (laePP: 0,42; [0,13, 0,70], laefPP: 0,41; [0,13, 0,69]) berechneten Werte der Effektgrößen zeigten jedoch nur einen kleinen Effekt. Es gab keinen signifikanten Unterschied in der Bewertung der CEPs zwischen der Teilnahme am naturwissenschaftlichen Zweig (laePP: $M = 2,85$, $SD = 1,3$, lafPP: $M = 2,9$, $SD = 1,1$) und der anderen Zweige (laePP: $M = 3,0$, $SD = 1,10$, lafPP: $M = 3,0$, $SD = 1,0$) mit Testergebnissen von laePP: $t(176) = 0,95$, $p < 0,34$, lafPP: $t(171) = 1,09$, $p < 0,28$. Die mit Cohen's d (laePP: 0,13; [-0,15, 0,41], laefPP: 0,15; [-0,13, 0,43]) berechneten Werte der Effektgrößen zeigten einen vernachlässigbaren Effekt. Auch hier bewerteten Teilnehmer des naturwissenschaftlichen Zweigs, als auch Teilnehmer anderer Zweige, APs signifikant besser als CEPs.

7.4 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse zum Lernen mit ästhetischen Bildern

Mit der Forschungsfrage 3 wurde untersucht, ob sich das Arbeiten mit ästhetisch und affektiv wahrgenommenen Bildern positiv auf den Wissenszuwachs insgesamt und in den einzelnen Themenbereichen auswirkt. Dafür wurde der Wissenstest Optik zusammengestellt, mit dem im Prä- und Posttest der Wissensstand der Schülerinnen und Schüler erhoben werden konnte. Es hat sich herausgestellt, dass Schülerinnen und Schüler in dieser Lernumgebung und in diesem Setting im Posttest nicht signifikant besser oder schlechter abschneiden als im Prätest. Generell ist nur beim Themenbereich Brechung eine Tendenz zur Verbesserung im Posttest zu erkennen. Da insgesamt keine Änderung im Wissenstest festgestellt werden konnte, kann verschiedene Gründe haben. Eine starke Vermutung ist, dass die Interventionszeit zu kurz war. Es ist plausibel, dass die Schülerinnen und Schüler ihr Wissen in vier verschiedenen Themenbereichen der Optik nach nur einer halben Stunde nicht signifikant verbessern konnten. Der Wissenstest basiert auf einem Konzepttest, sodass hier vorrangig Konzeptwissen abgefragt wird. Konzepte zu ändern, ist jedoch eine anspruchsvolle Aufgabe, die in der Regel in multiplen Schritten vollzogen wird (Krabbe & Fischer, 2020). Ein anderer Grund könnte die gesunkene Aufmerksamkeit am Ende einer Studie sein. So könnte die Analyse der Itemschwierigkeit in Kapitel 5.2.1 darauf hindeuten, dass Schülerinnen und Schüler beim Posttest mehr Leichtsinnsfehler gemacht haben. Letztendlich ist es plausibel, dass im Wissenstest Optik kein Wissenszuwachs gemessen werden konnte. Umso bemerkenswerter ist es, dass bei einigen Items im Posttest im Durchschnitt dennoch bessere Ergebnisse erzielt wurden, insbesondere bei solchen, deren Inhalte in der Lernumgebung thematisiert wurden, siehe auch Kapitel 7.1.

Insgesamt kann damit die Hypothese 3 zur Forschungsfrage 3 nicht angenommen werden. Ein Lernzuwachs konnte generell und bei einzelnen Themenbereichen nicht signifikant bestätigt werden.

Hinsichtlich der Forschungsfrage 4 lässt sich feststellen, dass auch hier keine signifikanten Ergebnisse bezüglich der Bearbeitungszeiten festgestellt werden konnten. Schülerinnen und Schüler haben bei den Lernaufgaben in der Lernumgebung mit den APs nicht besser abgeschnitten als mit den CEPs. Gleichzeitig haben sie mit den APs auch nicht schlechter geantwortet. Dies deutet darauf hin, dass die APs nicht ablenkend gewirkt haben, zumindest nicht ablenkender als die CEPs. Es lässt sich jedoch nicht feststellen, ob die ästhetisch und affektiv wahrgenommenen APs einen Vorteil gegenüber den CEPs geboten haben.

Auch bei den Bearbeitungszeiten der einzelnen Themenbereiche lässt sich kein klarer Trend zwischen dem Arbeiten mit APs und CEPs feststellen. Die Länge der Bearbeitungszeiten bei den APs und CEPs sind vergleichbar. Es konnten jedoch einige Beobachtungen gemacht werden: die durchschnittliche Bearbeitungszeit pro Lernaufgabe ungeachtet von der Bildkategorie ist beim ersten Themenbereich, Lichtausbreitung, am längsten. Eine Vermutung ist, dass bei den nachfolgenden Themenbereichen die Probanden mit der Lernumgebung vertraut waren, sodass sie die Lernaufgaben schneller bearbeiten konnten.

Eine mögliche Tendenz zeigt sich in der kürzeren Bearbeitungszeit des Themenbereichs Spektrum bei den APs im Vergleich zu den Probanden mit CEPs, wobei dieser Unterschied statistisch nicht abgesichert ist. Vermutungen für eine Erklärung basiert auf den theoretischen Grundlagen aus Kapitel 2.3.3. Das AP zeigt einen Regenbogen in der Natur, der den meisten Schülerinnen und Schülern vertraut ist. Im Gegensatz dazu ist der Overheadprojektor heutzutage im Alltag der Schülerinnen und Schüler weniger präsent, sodass ihnen auch das gezeigte Experiment eher unbekannt ist. Dies könnte bedeuten, dass die bildbezogenen Lernaufgaben für die Schülerinnen und Schüler mit dem AP einfacher zu bearbeiten waren. Auch bei den anschließenden Lernaufgaben zur Nennung der Wetterlage und der Position der Sonne könnte den Probanden die Lernaufgaben mithilfe des APs leichter gefallen sein. Eine längere Bearbeitungszeit bei den CEPs könnte hier also auf eine intensivere Auseinandersetzung mit den Aufgaben hindeuten.

Beim Thema Reflexion sind die Bearbeitungszeiten für das erste CEP und das zweite AP kürzer als für die entsprechenden Lernaufgaben zum zweiten CEP und ersten AP der anderen Untersuchungsgruppe. Hierbei ist zu beachten, dass die visuelle Komplexität beider CEPs eher gering ist. Das erste AP weist jedoch eine mittlere bis hohe visuelle Komplexität auf. Dies verleiht den ersten Lernaufgaben einen höheren Schwierigkeitsgrad, der eine intensivere Auseinandersetzung zum Beantworten der Lernaufgaben erfordert. Das zweite AP hingegen zeigt, wie auch die CEPs, eine mittlere bis niedrige visuelle Komplexität. Aufgrund der hohen Standardabweichungen lassen sich jedoch insgesamt keine eindeutigen Rückschlüsse ziehen, inwieweit mit dem ersten oder zweiten AP mehr gelernt wurde.

Insgesamt konnte in keinem der Themenbereiche eine signifikante Änderung der Bearbeitungszeit in Abhängigkeit der Bildkategorien festgestellt werden. Somit kann die Hypothese 4a zur Forschungsfrage 4a nicht angenommen werden.

Da keine signifikante Änderung der Bearbeitungszeit festgestellt wurde, konnte hinsichtlich Forschungsfrage 4b die Hypothese 4b nicht geprüft werden. Somit konnte in dieser Arbeit kein Lerneffekt anhand von ästhetischen Bildern gezeigt werden. Potenzielle Gründe wurden in diesem Kapitel diskutiert. Mögliche Folgestudien werden in der Diskussion in Kapitel 8 diskutiert.

8 Diskussion und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Effekt von Ästhetik in dekorativen und gleichzeitig instruktionalen Bildern im Physikunterricht untersucht. In einer Schulstudie wurden die subjektive visuelle Wahrnehmung der ausgewählten Bilder, der Wissenszuwachs sowie weitere Variablen bezüglich Interesse erhoben. Zur Vertiefung des Verständnisses der subjektiven visuellen Wahrnehmung wurde eine zusätzliche Interviewstudie durchgeführt. Damit wurden Arbeiten von unter anderem Lenzner et al. (2013) und Lindner (2020) erweitert. Im Folgenden werden die einzelnen Aspekte dieser Arbeit im Hinblick auf die Forschungsfragen und die Literatur diskutiert. Abschließend werden zukünftige auf dieser Arbeit aufbauende Studien und eine mögliche Einbettung in den Unterricht von morgen vorgeschlagen.

8.1 Theoriegeleiteter Kriterienkatalog für die Auswahl ästhetischer Bilder

Aus der Grundlage der vorhandenen Literatur zu Funktionen von visuellen Darstellungen im Physikunterricht und motivationalen Aspekten im Lernprozess (Girwidz, 2020b; Moreno, 2006), wurde die Art der visuellen Darstellung und Funktionen der Bilder gewählt. Basierend auf weiterführender Literatur wurden Kriterien für Merkmale ästhetischer Bilder formuliert. Insbesondere erwiesen sich die Arbeiten von Leder et al. (2004) und darauf aufbauende Studien als erfolgreiche Grundlage. Zudem wurden Aspekte der Physikdidaktik einbezogen.

Tabelle 8.1: Kriterienkatalog für die Auswahl ästhetischer Bilder

Kriterium	Ausrichtung und Literaturhinweise
<i>Ästhetische Kriterien</i>	
Farbe	Grundlegendes Merkmal ästhetischer Objekte; allgemeine Präferenz für gesättigtere Farben, solange natürliche Farbtöne erhalten bleiben.
Kontrast	Präferenz für hohe Kontraste
Visuelle Komplexität	Präferenz für ein moderates Maß an visueller Komplexität
Symmetrie	Falls der Inhalt eine Symmetrie aufweist, sollte das Bild der Symmetrie folgen.
Ordnung und Gruppierung	Objekte stehen nicht irreführend nah beieinander. Elemente, die eine größere Ähnlichkeit aufweisen, werden als zusammengehörig wahrgenommen.
Vertrautheit	Das Erkennen vertrauter visueller Elemente oder Strukturen wird als belohnende Erfahrung wahrgenommen und löst positive emotionale Reaktionen aus.
<i>Affektive Kriterien</i>	
Kontext	Bestimmte Kontexte können Interesse und weitere affektive Variablen erhöhen.

Der entwickelte Kriterienkatalog, siehe Kapitel 2.3.6 sowie Tabelle 8.1, führte zur Auswahl von vier APs. Diese sind besonders farbenfroh und zeigen physikalische Phänomene im Kontext Natur. Als Kontrast zu den APs wurden vier CEPs erstellt. Sie zeigen die gleichen Phänomene im Kontext Klassenzimmer und sind dabei weniger farbenfroh.

8.2 Instrument zur Messung der subjektiven visuellen Ästhetik

Im Weiteren dienten die vier ausgewählten APs als Grundlage für die Erstellung und Durchführung einer Schulstudie. Zur Messung der subjektiven visuellen Ästhetik wurde ein psychometrischer Test auf Basis der Arbeiten von Lenzner und Miller entwickelt. Eine explorative Faktorenanalyse unterstützte die Vermutung, dass die Skala zur subjektiven visuellen Ästhetik aus zwei Faktoren, der ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung besteht. Dies bestätigt, dass die Skalen von Lenzner et al. (2013) und von Miller (2011) ergänzend verwendet werden können. Zur Bestätigung der Argumentation der Relevanz der ästhetischen und affektiven sowie inhaltlichen Kriterien wurden zusätzlich kurze Interviews durchgeführt. Die Probanden erkannten und benannten Aspekte wie Farbe, visuelle Komplexität und Kontrast sowie kontextbezogene Assoziationen. Mithilfe dieser Aspekte argumentierten sie, ob sie Bilder als mehr oder weniger ästhetisch empfanden.

Damit unterstützt die Interviewstudie den a priori entwickelten Kriterienkatalog, da die genannten Kriterien auch dort zentraler Bestandteil der subjektiven visuellen Ästhetik sind. Im Folgenden wird zunächst auf die ästhetische und anschließend auf die affektive Bildwahrnehmung eingegangen.

Die Beobachtungen der Interviews entsprechen den Ergebnissen von Moshagen und Thielsch (2010), die in Interviews hervorhoben, dass eine geringe visuelle Komplexität und Farben die beiden wichtigsten Aspekte der Ästhetik von Websites sind. Entsprechend den Ergebnissen von Halonen (2014), Deng et al. (2017) und Joye et al. (2013) bestätigt auch die vorliegende Arbeit, dass Farbigkeit ein guter Prädiktor für die wahrgenommene visuelle Ästhetik ist. In Übereinstimmung mit Joye et al. (2013) waren auch die hier eingesetzten Bilder mit dem Kontext Natur bunter als die jeweiligen Gegenstücke. Obwohl die Stichprobengröße der Interviews mit 18 Teilnehmern relativ klein war, sind die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der ästhetischen Wirkung der Bilder eindeutig und konsistent.

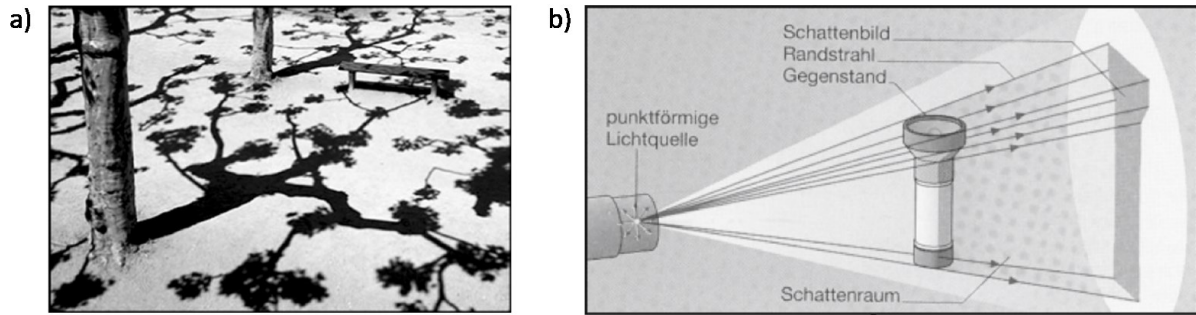


Abbildung 8.1: Beispielhaftes a) dekoratives und b) instruktionales Bild aus der Studie von Lenzner et al. (2013). In der originalen Studie wurden farbige Versionen der Bilder verwendet. Reproduziert mit Genehmigung von SNCSC. Nicht Teil der Open Access Lizenz.

Neben der ästhetischen Bildwahrnehmung ist auch die affektive Bildwahrnehmung ein entscheidender Faktor und wird im Folgenden tiefergehend diskutiert. Die Entwicklung der Items für die Subskala lafPP basiert unter anderem auf den Arbeiten von Lenzner et al. (2013). In diesen Studien wurde ein Instrument zur Bewertung dekorativer Bilder entwickelt, aus dem drei Items in gleicher Formulierung in die vorliegende Arbeit übernommen wurden. Die in Lenzners Studie verwendeten dekorativen Bilder haben ebenfalls das Ziel, ansprechend zu wirken, und sind daher mit den in der vorliegenden Arbeit verwendeten APs vergleichbar, siehe Abbildung 8.1 für ein Beispiel. Als Kontrast wurden in der vorliegenden Arbeit CEPs als ästhetisch weniger wirksame Bilder eingesetzt, während in Lenzners Studie rein instruktionale Schemazeichnungen als Vergleich herangezogen wurden. Damit ist die Art der visuellen Darstellung zwar unterschiedlich, jedoch wird in beiden Fällen ein ästhetisches Bild und ein weniger ästhetisches Bild zum Thema geometrische Optik miteinander verglichen (Abbildung 8.1). Dies ermöglicht einen Vergleich der Bildbewertungen für die drei gemeinsamen Items. Die Tabelle 8.2 zeigt die Mittelwerte der einzelnen Items für die APs bzw. CEPs dieser Arbeit sowie für die entsprechenden Items der dekorativen bzw. instruktionalen Bilder aus Lenzners Studien. Es zeigt sich, dass die in dieser Arbeit erhobenen Werte innerhalb der Standardabweichungen der ermittelten Werte von Lenzner liegen. Dies lässt darauf schließen, dass die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sowohl in Bezug auf die ausgesuchten Fotografien als auch auf die Antworten der Probanden im Hinblick auf affektive Komponenten mit den Ergebnissen Lenzners konsistent sind.

Tabelle 8.2: Vergleich der Bildbewertungen zwischen Bildern aus dieser Arbeit und rein dekorativen sowie rein instruktionalen Bildern aus der Studie von Lenzner. Lenzner et al. (2013): $N_{\text{dekorativ}} = 18$, $N_{\text{instruktional}} = 9$, $N_{\text{Probanden}} = 57$, diese Arbeit: $N_{\text{AP}} = N_{\text{CEP}} = 4$, $N_{\text{Probanden}} = [57 - 60]$.

Studie	Item Kurzform	AP / dekoratives Bild		CEP / instruktionales Bild	
		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Vorliegende Arbeit	Gut	4,0	0,8	3,0	0,8
Lenzner		4,04	0,48	2,64	0,91
Vorliegende Arbeit	Wach	3,2	0,8	2,7	0,7
Lenzner		3,64	0,58	2,86	0,99
Vorliegende Arbeit	Ruhig	4,1	0,8	3,1	0,8
Lenzner		3,86	0,54	2,96	0,94

8.3 Ästhetische und affektive Bildwahrnehmung

Mit dem Einsatz des Instruments bestehend aus den Instrumenten zur ästhetischen und affektiven Bildwahrnehmung konnte in der vorliegenden Arbeit festgestellt werden, dass die Probanden die ausgewählten APs als signifikant ästhetischer und affektiver wahrgenommen haben als die verwendeten CEPs. Dieser quantitative Befund bestätigt die Auswahl ästhetisch und affektiv wirksamer Bilder nach den zuvor entwickelten Kriterien. Die Ergebnisse der Schulstudie sowie der Interviewstudie deuten damit darauf hin, dass sich mit den zusammengestellten Kriterien effektiv ästhetisch wahrgenommene Bilder für den Einsatz im Physikunterricht auswählen lassen. Dies bestätigt nicht nur die Möglichkeit, sondern darüber hinaus auch die Nützlichkeit des Ansatzes bei der Bildauswahl sowohl ästhetische als auch affektive und inhaltsbezogene Kriterien zu berücksichtigen.

Bemerkenswert ist, dass die Bewertungen jedes Bildes, unabhängig von der Bildkategorie AP oder CEP, bei beiden Skalen laePP und lafPP ähnlich ausgefallen sind. Dies muss jedoch nicht zwangsläufig bei weiteren Bildern der Fall sein. Während bei den hier verwendeten Bildern ein starker Fokus auf ästhetische Aspekte gelegt wurde, wurde die affektive Komponente nicht unabhängig variiert. Vergleicht man die hier verwendeten Bilder zum Beispiel mit Bildern, die gezielt verschiedene Emotionen wie Wut, Trauer, Ärger, Freude oder Neugierde auslösen, sollte sich ein deutlicher Unterschied in der affektiven Bildwahrnehmung zeigen. Die in dieser Arbeit verwendeten APs lassen sich am ehesten der Kategorie „Freude“ zuordnen. Bei den erstellten CEPs bleiben die hervorgerufenen Emotionen unklar; lediglich ein paar Interviewprobanden nannten „Langeweile“. Das deutet auf eine schwache affektive Komponente der CEPs hin. Diese Vermutung wird von der Faktoranalyse bestätigt, da die Items von lafPP nicht klar auf den zweiten „affektiven“ Faktor laden.



Abbildung 8.2: Beispiel für eine Fotografie mit hoher emotionaler Komponente. „Dieser afrikanische Junge scheint so arm zu sein, dass er lieber ein Kleid trägt, als nackt zu gehen. Er steht inmitten eines Meeres von "fliegenden Toiletten" (mit Exkrementen und Urin abgefüllten Einkaufstüten) neben zwei verlassenen Latrinen.“ Bild: Michael E. Arth, Lizenz: CC-BY-4.0.

Bilder wie die UNICEF Fotos des Jahres erregen unsere Emotionen weitaus stärker. Diese Bilder haben ebenfalls einen Auswahlprozess durchlaufen. UNICEF verfolgt mit den Bildern jedoch ein anderes Ziel als die hier ausgewählten APs: Die Bilder des Jahres sollen gezielt Empathie hervorrufen und zeigen, wie Kinder inmitten verschiedener Krisen aufwachsen. Ein vergleichbares Bild dazu ist in Abbildung 8.2 präsentiert. Es zeigt die Armut in Kenia und wurde von einem professionellen Fotografen erstellt. In Bezug auf die affektive Bildwahrnehmung kann für dieses Bild vermutet werden, dass die Bewertung stärker ausfällt und unabhängig von der subjektiven visuellen Ästhetik ist. Das Instrument zur subjektiven visuellen Ästhetik könnte nach der Bewertung von solchen Bildern dementsprechend andere Faktorladungen zeigen. Zukünftige Studien könnten hier klären, inwiefern weitere nach dem Kriterienkatalog ausgewählte ästhetische und weniger ästhetische Bilder im Hinblick auf beide Subskalen bewertet werden. Für eine Einbindung in den Physikunterricht sollte jedoch zusätzlich zu den affektiven und ästhetischen Gesichtspunkten immer die instruktionale Einbindung berücksichtigt werden.

8.4 Lernen mit ästhetischen Bildern

Für die Untersuchung, ob ästhetische und affektive Komponenten im Lernprozess förderlich oder hinderlich sind, wurden die Bilder in eine Lernumgebung integriert. Die Lernumgebung wurde auf

Basis aktueller Erkenntnisse der Medientheorie und Physikdidaktik entwickelt. So wurde Feedback als Unterstützung für Lernende bei der Einzelarbeit bereitgestellt. Feedback, insbesondere auch automatisiertes Feedback wird generell als lernförderlich angesehen (Hattie & Timperley, 2007; van der Kleij et al., 2015).

Generell und in den einzelnen Themenbereichen konnte kein signifikanter Wissenszuwachs festgestellt werden. Es liegt die Vermutung nahe, dass dies an der insgesamt kurzen Interventionszeit von nur einer halben Stunde liegt. Es ist unwahrscheinlich, dass in einem so kurzen Zeitraum Verbesserungen beim konzeptionellen Verständnis optischer Phänomene stattfinden und erkennbar werden. Allerdings sind nach Krabbe und Fischer (2020) „attitudes“ (Einstellungen) eines von fünf zentralen Lernzielen. Demnach konnte mit den hier verwendeten ästhetischen Bildern zumindest ein Lernziel, die Förderung der Faszination, erreicht werden. In folgenden Studien sollte untersucht werden, inwiefern die ästhetische und affektive Wahrnehmung bei längeren Interventionen einen Wissenszuwachs bei den Schülerinnen und Schülern begünstigen kann.

Des Weiteren konnte kein Wissensunterschied beim Arbeiten mit APs oder CEPs festgestellt werden. Daher bleibt unklar, ob die CEPs beim Lernen physikalischer Inhalte einen Vorteil bieten. Die CEPs könnten die physikalischen Phänomene möglicherweise klarer und leichter erkennbar darstellen. Auch hier kann eine zukünftige Studie mit längerer Interventionszeit weitere Einsichten bringen.

Ein weiterer Vorteil von CEPs könnte ihre Verbindung mit experimentellen Arbeitsweisen sein. Wenn ästhetische Naturbilder es schaffen, Natur und Alltag hervorzuheben, wäre es naheliegend, dass CEPs den experimentellen Charakter eines Phänomens betonen. Dies bleibt jedoch eine Vermutung. Ein Einsatz von CEPs in Bezug zu experimentellen Arbeitsweisen könnte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein. Eine mögliche Forschungsfrage wäre: Unterstützen CEPs die Motivation von Experimenten?

8.5 Weiterführende Forschungsperspektiven

Überdies könnte in weiterführenden Studien untersucht werden, inwiefern die Lernphase einen Einfluss auf die Bildwahrnehmung hat. Aus didaktischer Perspektive können APs in verschiedenen Lernphasen des Physikunterrichts integriert werden: zu Beginn eines Unterrichtsabschnittes zu einem bestimmten Inhalt, um einen ersten Eindruck zu vermitteln oder am Ende zur Vertiefung und Verfestigung des Gelernten. In der vorliegenden Arbeit wurden die Bilder am Ende eines Unterrichtsabschnittes eingesetzt. Eine weitere Untersuchung könnte APs zur Einführung eines Themas nutzen, was eine geringere Vertrautheit der Teilnehmenden mit den Inhalten bedeuten würde. Eine subjektive visuelle Bildästhetik der APs und CEPs könnte dabei anders ausfallen. Für eine

solche Studie müssten andersartige Lernaufgaben entwickelt werden. Die Bilder der vorliegenden Arbeit für geometrische Optik könnten jedoch verwendet werden.

Während die geometrische Optik sich für eine initiale Untersuchung ästhetischer Bilder angeboten hat, sollte untersucht werden, inwiefern das hier entwickelte Instrument auf Bilder mit anderen Inhalten anwendbar ist. Die Antworten der Interviewprobanden legen nahe, dass nicht nur Ästhetik und Kontext, sondern auch der Bildinhalt, z.B. ein Sonnenuntergang, zu der subjektiven visuellen Ästhetik beitragen. Zukünftige Forschungen könnten den Bildinhalt auf weitere Themenbereiche der Physik wie Mechanik oder Thermodynamik ausweiten. Darüber hinaus stellt sich die Frage, inwieweit der Alltagsbezug der Inhalte eine Rolle spielt.

In der Thermodynamik ließe sich zudem ein Schritt weiter gehen, indem farbkodierte Infrarotfotografien eingesetzt werden, siehe Abbildung 1.2, d) oder Abbildung 8.3. Zukünftige Studien könnten auch den Einfluss der Art der visuellen Darstellung untersuchen. Da eine Ausweitung von reinen Fotografien auf weitere Bildarten deutlich mehr Variablen bedeutet hätte, wurden unter anderem deshalb in dieser Arbeit nur Fotografien berücksichtigt. Dennoch konnte ästhetischen Elementen nicht nur im Webdesign, sondern auch im Design von Lernumgebungen eine relevante Rolle nachgewiesen werden. Daher ist es naheliegend, dass auch andere Arten von visuellen Darstellungen, wie etwa Schemazeichnungen, vielversprechende Ergebnisse liefern. Dies könnte zusätzlich darüber Aufschluss geben, inwiefern die technische Darstellung die subjektive visuelle Bildästhetik beeinflusst. Weitere farbkodierte Bilder finden sich zum Beispiel in der Astronomie (Abbildung 1.2, c)).

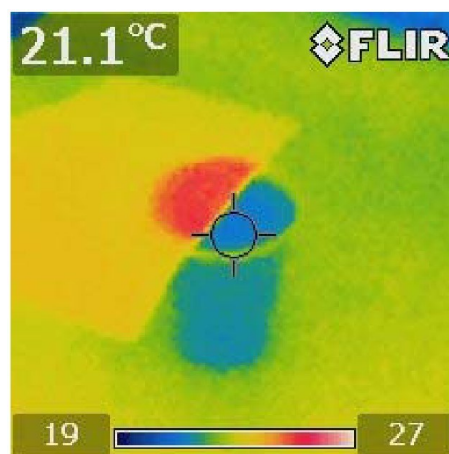


Abbildung 8.3: Ästhetik in der Thermodynamik, von Xie (2011). Das Foto zeigt ein Stück Papier, das die Oberseite eines mit Wasser gefüllten Bechers halb bedeckt, im infraroten Spektralbereich. Somit kann die kühlende Wirkung aufgrund der Verdunstung an der Wasseroberfläche sowie die wärmende Wirkung aufgrund der Kondensation auf dem Papier veranschaulicht werden. Reproduziert mit Genehmigung, Copyright 2011 American Chemical Society.

Weiterhin bieten die Thermodynamik oder die Astronomie inhärent interessante Kontexte (Hoffmann et al., 1998). Insbesondere Bilder eignen sich dazu, Inhalte dieser Themengebiete mit einem interessanten Kontext zu verbinden. In dieser Studie diente die Natur als ästhetischer Kontext, um das Interesse zu steigern und damit die Probanden zu motivieren, sich intensiver mit den physikalischen

Phänomenen auseinanderzusetzen. Der Kontext Natur ist in zwei Gründen passend gewählt: Erstens zeigte die Interessensstudie am IPN, dass Naturphänomene als Kontext bei Interesse gut abschneiden (Hoffmann et al., 1998). Zweitens sind Natur und Ästhetik eng miteinander verknüpft (Berlyne, 1974; Joye et al., 2013). Eine weiterführende Studie könnte in Betracht ziehen, die Kontexte an die spezifischen Interessen der Schülerinnen und Schüler anzupassen.

8.6 Ausblick zu computergenerierten ästhetischen Bildern

Mit Bildbearbeitungsprogrammen wie Photoshop lassen sich Bilder relativ einfach hinsichtlich ihrer Farbtiefe, Farbbrillanz und Kontrast verstärken, um den ästhetischen Gehalt zu steigern. Änderungen des Kontextes erfordern jedoch einen erheblichen Aufwand.

Neuronale Netzwerke, die häufig als Grundlage für sogenannte künstliche Intelligenz (KI) dienen, können inzwischen Bilder nach den hier vorgestellten Kriterien für ästhetische Bilder mit spezifischen Kontexten generieren. Je präziser die Vorgaben formuliert werden, desto zweckmäßiger sind die Ergebnisse. In diesem Zusammenhang gewinnt der Kriterienkatalog an Bedeutung, da er die aufwendige Formulierung eines aussagekräftigen Prompts leiten kann. Damit könnte die noch aufwendigere Suche nach passenden Bildern abgekürzt werden und die Prinzipien dieser Arbeit auf andere Inhalte, Kontexte und visuelle Darstellungsarten erweitert werden. Darüber hinaus kann auf die persönlichen Vorlieben bezüglich Ästhetik und Kontext eines Lernenden eingegangen werden.

Die in dieser Arbeit verwendeten APs konnten mithilfe des neuronalen Netzwerks „stable diffusion“ imitiert werden. Für die Bilder in Abbildung 8.4 wurden Prompts aus den Stichworten der Aspekte des Kriterienkatalogs und ihrer optimalen Ausprägung erstellt. Diese Prompts wurden an „stable diffusion“ übergeben, um jeweils Beispielbilder zu generieren. Die Bilder, die sowohl den ästhetischen und affektiven Kriterien als auch inhaltlich den physikalischen Gesetzen am besten entsprachen, wurden für die Abbildung 8.4 ausgewählt.

Bei den so generierten Bildern wird jedoch deutlich, dass die aktuellen neuronalen Netzwerke nicht den Grundlagen der Physik, insbesondere der geometrischen Optik (siehe Kapitel 2.4.1) folgen. Die computergenerierten Bilder in Abbildung 8.4 beinhalten ästhetische Aspekte, sind aber inhaltlich fehlerbehaftet. Am auffälligsten ist hier die Orientierung des reellen Bildes der Landschaft in der Kugel von Abbildung 8.4 d). Eine genauere Betrachtung der Abbildung 8.4 a) zeigt außerdem Ungenauigkeiten des Ursprungs der Strahlenbündel. Eine interessante Möglichkeit der instruktionalen Einbindung wäre, die Schülerinnen und Schüler aktiv nach Fehlern suchen zu lassen, um zusätzlich kritisches Denken im Physikunterricht zu schärfen. Weiterhin bietet dies die Möglichkeit, die Schülerinnen und Schüler hinsichtlich Fake News zu sensibilisieren. Für einen traditionellen Einsatz ist es daher essenziell, bei der Generierung von Bildern für den Physikunterricht die physikalische

Korrektheit der dargestellten Phänomene kritisch zu prüfen. Insgesamt zeigen neuronale Netzwerke dennoch vielversprechende Fortschritte in der Generierung ästhetisch ansprechender Bilder für den künftigen Einsatz im Physikunterricht.



Abbildung 8.4: Mit dem Kriterienkatalog und dem neuronalen Netzwerk „stable diffusion“ generierte Bilder zu den in der vorliegenden Arbeit behandelten Themenbereichen: a) Lichtausbreitung, b) Spektrum, c) Reflexion, d) Brechung.

8.7 Schlussbemerkungen

Insgesamt wurde in dieser Arbeit gezeigt, dass der entwickelte Kriterienkatalog eine wertvolle Grundlage für die Auswahl von ästhetischen Bildern ist, die bei Lernenden eine signifikante positive ästhetische und affektive Wahrnehmung hervorrufen. Die ästhetischen Bilder wurden instruktional in eine Lernumgebung integriert und mittels eines in dieser Arbeit entwickelten und validierten Instruments bezüglich der subjektiven visuellen Ästhetik quantifiziert. Der Kriterienkatalog kann somit eine praktische Orientierung für Lehrkräfte und Forschende bei der Auswahl ästhetischer Bilder darstellen. Damit wurde eine Grundlage gelegt, um die weitere Nutzung des pädagogischen Potenzials von ästhetischen Bildern im Physikunterricht und die Faszination und Engagement im naturwissenschaftlichen Unterricht zu erforschen. Insbesondere hinsichtlich den aktuellen Entwicklungen zu neuronalen Netzwerken bilden die Produkte dieser Arbeit einen wichtigen Grundstein für einen vermehrten Einsatz von ästhetischen Bildern im Physikunterricht.

Literaturverzeichnis

- Abele-Brehm, A. (1992). Positive and negative mood influences on creativity: Evidence for asymmetrical effects. *Polish Psychological Bulletin*, 23(3), 203–221.
<https://psycnet.apa.org/record/1993-37481-001>
- Ainsworth, S. (2006). DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16(3), 183–198.
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.03.001>
- Baadte, C. & Schnotz, W. (2014). Feedback Effects on Performance, Motivation and Mood: Are They Moderated by the Learner's Self-Concept? *Scandinavian Journal of Educational Research*, 58(5), 570–591. <https://doi.org/10.1080/00313831.2013.781059>
- Baron, M. (2019). *Probability and statistics for computer scientists* (Third edition). CRC Press, Taylor & Francis Group.
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315172286/probability-statistics-computer-scientists-michael-baron> <https://doi.org/10.1201/9781315172286>
- Bennett, J. (2016). Bringing Science to Life. In *Advances in Learning Environments Research. Teachers Creating Context-Based Learning Environments in Science* (S. 21–39). SensePublishers.
https://doi.org/10.1007/978-94-6300-684-2_2
- Ben-Shachar, M., Lüdtke, D. & Makowski, D. (2020). effectsize: Estimation of Effect Size Indices and Standardized Parameters. *Journal of Open Source Software*, 5(56), 2815.
<https://doi.org/10.21105/joss.02815>
- Berlyne, D. E. (1974). The new experimental aesthetics. *The American Journal of Psychology*, 88(3), 520–523. <https://doi.org/10.2307/1421783>
- Berlyne, D. E. (1978). Curiosity and learning. *Motivation and Emotion*, 2(2), 97–175.
<https://doi.org/10.1007/BF00993037>
- Birkhoff, G. D. (1933). *Aesthetic Measure*. Harvard University Press. https://www-degruyter-com.emedien.ub.uni-muenchen.de/view/title/321178?tab_body=toc
<https://doi.org/10.4159/harvard.9780674734470>
- Bozkuş, R. (2018). *Sunset-Dawn-Nature-Mountains: [Bild]*. Pixabay.
<https://pixabay.com/photos/sunset-dawn-nature-mountains-3314275/>
- Brandt, H. (2020). Exploratorische Faktorenanalyse (EFA). In H. Moosbrugger & A. Kelava (Hrsg.), *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion. Lehrbuch* (3. Aufl., S. 575–614). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61532-4_23

- Calvo Ivanovic, I. (2018). Symbolic Color Associations in Goethe's Farbenlehre and its application in the pictorial work of its early receptors. *Cultura e Scienza del Colore - Color Culture and Science*(9), 65–73. <https://doi.org/10.23738/ccsj.i92018.07>
- Carney, R. N. & Levin, J. R. (2002). Pictorial Illustrations Still Improve Students' Learning from Text. *Educational Psychology Review*, 14(1), 5–26. <https://doi.org/10.1023/A:1013176309260>
- Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V. & Niknafs, A. (2014). NbClust : An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *Journal of Statistical Software*, 61(6), 1–36. <https://doi.org/10.18637/jss.v061.i06>
- Chiu, T. K. F., Jong, M. S. & Mok, I. A. C. (2020). Does learner expertise matter when designing emotional multimedia for learners of primary school mathematics? *Educational Technology Research and Development*, 68(5), 2305–2320. <https://doi.org/10.1007/s11423-020-09775-4>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). L. Erlbaum Associates.
- Comenius, J. A. (1658, 1968). *The Orbis pictus of John Amos Comenius*. Singing Tree Press.
- Dalmajer, E. S., Nord, C. L. & Astle, D. E. (2022). Statistical power for cluster analysis. *BMC Bioinformatics*, 23(1), 205. <https://doi.org/10.1186/s12859-022-04675-1>
- Deeva, G., Bogdanova, D., Serral, E., Snoeck, M. & Weerdt, J. de (2021). A review of automated feedback systems for learners: Classification framework, challenges and opportunities. *Computers & Education*, 162, 104094. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.104094>
- Demtröder, W. (2017). *Experimentalphysik* 2. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55790-7>
- Deng, Y., Loy, C. C. & Tang, X. (2017). Image Aesthetic Assessment: An Experimental Survey. *IEEE Signal Processing Magazine*, 34(4), 80–106. <https://doi.org/10.1109/MSP.2017.2696576>
- Easterbrook, J. A. (1959). The effect of emotion on cue utilization and the organization of behavior. *Psychological review*, 66(3), 183–201. <https://doi.org/10.1037/h0047707>
- Ellis, H. C. & Ashbrook, P. W. (1988). Resource allocation model of the effect of depressed mood states on memory. *Affect, cognition, and social behavior*. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572261550510727552>
- Euler, M. (2020). Wege in die Nanowelt: Skalierungs- und Strukturprinzipien, Werkzeuge der Erkenntnisgewinnung, Modelle und Experimente. In E. Kircher, R. Girwidz & H. E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik | Methoden und Inhalte* (4. Auflage, S. 325–359). Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59496-4_11
- Fenner, D. (2020). Developing Aesthetic Taste. *Journal of Aesthetic Education*, 54(2), 113–122. <https://doi.org/10.5406/jaesteduc.54.2.0113>
- Field, A., Miles, J. & Field, Z. (2012). *Discovering statistics using R*. Sage Publications Ltd.

- Frith, C. D. & Nias, D. K. (1974). What determines aesthetic preferences? *The Journal of general psychology*, 91(2d Half), 163–173.
- Gamer, M., Lemon, J. & Singh, I. F. P. (2005). *irr: Various Coefficients of Interrater Reliability and Agreement* (Version 0.84.1) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=irr>
- Gilbert, J. K., Reiner, M. & Nakhleh, M. (2008). *Visualization: Theory and Practice in Science Education* (1st ed. 2008). *Models and Modeling in Science Education: Bd. 3*. Springer Netherlands; Imprint: Springer.
- Girwidz, R. (2009). Bilder und bildhafte Darstellungen. Visuelle Darstellungsmittel im Unterricht nutzen. *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, 20(109), 4–9.
- Girwidz, R. (2020a). Experimente im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz & H. E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik | Grundlagen* (S. 263–291). Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2_7
- Girwidz, R. (2020b). Medien im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz & H. E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik | Grundlagen* (S. 293–335). Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2_8
- Goldhammer, F., Naumann, J., Stelter, A., Tóth, K., Rölke, H. & Klieme, E. (2014). The time on task effect in reading and problem solving is moderated by task difficulty and skill: Insights from a computer-based large-scale assessment. *Journal of Educational Psychology*, 106(3), 608–626. <https://doi.org/10.1037/a0034716>
- Gou, Y. (2016). *plom ayı in the world: [Bild]*. American Association of Physics Teachers. https://www.aapt.org/photodirectory/2016_C-731_in%20the%20world_lg.jpg
- Górniak, M. (2009). *Unterschiede im ästhetischen Urteil über gläserne Dachkonstruktionen* [Diplomarbeit]. Dresden, Technische Universität Dresden.
- Halonen, R. (2014). *From photographers to viewers – what makes editorial photos interesting?* Aalto University. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201410012678>
- Hansbauer, A., Schmidt, T. & Schreyer, A. (2016). *Das Zusammenwirken von intuitiver und reflektiver Ästhetik mit ästhetischen Attributen und personenbezogenen Faktoren.: Eine empirische Studie zur ästhetischen Präferenz von Webseiten*. Universität Regensburg.
- Hantula, D. A., Sudduth, M. M. & Clabaugh, A. (2009). Technological Effects on Aesthetic Evaluation: Vermeer and the Camera Obscura. *The Psychological Record*, 59(3), 323–333. <https://doi.org/10.1007/BF03395667>
- Harp, S. F. & Mayer, R. E. (1997). The role of interest in learning from scientific text and illustrations: On the distinction between emotional interest and cognitive interest. *Journal of Educational Psychology*, 89(1), 92–102. <https://doi.org/10.1037//0022-0663.89.1.92>

- Hasler, D. & Suesstrunk, S. E. (2003). Measuring colorfulness in natural images. In B. E. Rogowitz & T. N. Pappas (Hrsg.), *SPIE Proceedings, Human Vision and Electronic Imaging VIII* (S. 87–95). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.477378>
- Hattie, J. & Gan, M. (2011). INSTRUCTION BASED ON FEEDBACK. In *Handbook of Research on Learning and Instruction* (S. 263–285). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203839089-22>
- Hattie, J. & Timperley, H. (2007). The Power of Feedback. *Review of Educational Research*, 77(1), 81–112. <https://doi.org/10.3102/003465430298487>
- Hecht, E. (2018). *Optik* (K. Lippert, Übers.) (7. Auflage). *De Gruyter Studium*. Walter de Gruyter GmbH.
- Hekkert, P. (2006). Design aesthetics: Principles of pleasure in design. *Psychology Science*, 48(2), 157–172. https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/54686438/Hekkert_P._Design_aesthetics_principles_of_pleasure_in_design.pdf
- Hettmannsperger, R., Müller, A., Scheid, J., Kuhn, J. & Vogt, P [Patrik] (2021). KTSO-A: KONZEPTTEST-STRAHLENOPTIK – ABBILDUNGEN. Entwicklung eines Konzepttests zur Erfassung von Konzepten der Lichtausbreitung, Streuung und der Entstehung reeller Bilder im Bereich der Strahlenoptik. *Progress in Science Education*, 4(1), 11–35. <https://doi.org/10.25321/prise.2021.1015>
- Hoffmann, L. (2002). Promoting girls' interest and achievement in physics classes for beginners. *Learning and Instruction*, 12(4), 447–465. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(01\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(01)00010-X)
- Hoffmann, L., Häussler, P. & Lehrke, M. (1998). *Die IPN-Interessenstudie Physik. IPN: Bd. 158*. IPN.
- Ilgaya, K., Yi, S., Wahle, I. A., Tanwisuth, K. & O'Doherty, J. P. (2021). Aesthetic preference for art can be predicted from a mixture of low- and high-level visual features. *Nature Human Behaviour*, 5(6), 743–755. <https://doi.org/10.1038/s41562-021-01124-6>
- Inkscape Developers. (2022). *Inkscape* (Version 1.2.2) [Computer software]. <https://inkscape.org>
- Isik, A. I. & Vessel, E. A. (2021). From Visual Perception to Aesthetic Appeal: Brain Responses to Aesthetically Appealing Natural Landscape Movies. *Frontiers in human neuroscience*, 15, 676032. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.676032>
- Joye, Y., Pals, R., Steg, L. & Lewis-Evans, B. (2013). New methods for assessing the fascinating nature of nature experiences. *PloS one*, 9(1), e65332. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065332>
- Kant, I. (1790). *Critik der Urteilkraft*. Lagarde und Friederich. https://media.hugendubel.de/shop/coverscans/233/23320155_iverz.pdf
- Kaplan, R. & Kaplan, S. (1989). *The experience of nature: A Psychological Perspective*. Cambridge University Press.

- Kauertz, A. & Fischer, H. E [Hans E.]. (2020). Aufgaben im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz & H. E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik | Grundlagen* (S. 427–456). Springer Spektrum.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2_12
- Kaufman, L. & Rousseeuw, P. J. (1990). *Finding groups in data: An introduction to cluster analysis*. Wiley series in probability and mathematical statistics. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9780470316801>
- Kircher, E. & Girwidz, R. (2020). Elementarisierung und didaktische Rekonstruktion. In E. Kircher, R. Girwidz & H. E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik | Grundlagen* (S. 155–198). Springer Spektrum.
- Kline, T. (2005). *Psychological testing: A practical approach to design and evaluation*. Sage Publications. <https://doi.org/10.4135/9781483385693>
- München: Luchterhand (2004).
- München: Luchterhand (2024).
- Knörzer, L., Brünken, R. & Park, B. (2016). Emotions and multimedia learning: the moderating role of learner characteristics. *Journal of Computer Assisted Learning*, 32(6), 618–631.
<https://doi.org/10.1111/jcal.12158>
- Koenen, J., Kobbe, J. & Rumann, S. (2020). Umgang mit Bildern in den Naturwissenschaften – Ein sequenziertes Training der Piktorialen Literalität. *Unterrichtswissenschaft: Zeitschrift für Lernforschung*, 48(1), 91–112. <https://doi.org/10.1007/s42010-019-00066-3>
- Kong, S., Shen, X., Lin, Z., Mech, R. & Fowlkes, C. (2016). Photo Aesthetics Ranking Network with Attributes and Content Adaptation. In B. Leibe, J. Matas, N. Sebe & M. Welling (Hrsg.), *Computer Vision - ECCV 2016* (S. 662–679). Springer International Publishing.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-46448-0_40
- Krabbe, H. & Fischer, H. E [Hans E.]. (2020). Gestaltung von Unterricht. In E. Kircher, R. Girwidz & H. E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik | Grundlagen* (S. 117–153). Springer Spektrum.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2_4
- Krapp, A. (1992). *Das Interessenkonstrukt Bestimmungsmerkmale der Interessenhandlung und des individuellen Interesses aus der Sicht einer Person- Gegenstands-Konzeption*. Interesse, Lernen, Leistung. *Arbeiten zur sozialwissenschaftlichen Psychologie: Bd. 24*. Aschendorff.
- Kuhn, J. (2010). *Authentische Aufgaben im theoretischen Rahmen von Instruktions- und Lehr-Lern-Forschung: Optimierung von Ankermedien für eine neue Aufgabenkultur im Physikunterricht*. Zugl.: Koblenz-Landau, Univ., Habil.-Schr., 2008 (1. Aufl.). Vieweg + Teubner.
- Kuhn, J., Müller, A., Müller, W. & Vogt, P [Patrick] (2010). Kontextorientierter Physikunterricht: Konzeptionen, Theorien und Forschung zu Motivation und Lernen. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*. http://www.mathphys.uni-freiburg.de/physik/filk/public_html/InfoLehramt/FD17_QhxBz/PDN_Kontextorientierung.pdf

- Kushel, D. A. (1985). Applications of transmitted infrared radiation to the examination of artifacts. *Studies in Conservation*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1179/sic.1985.30.1.1>
- Kutschera, F. von. (1988). *Ästhetik*. De Gruyter.
- Labudde, P. & Metzger, S. (2019). *Fachdidaktik Naturwissenschaft*. UTB GmbH - Haupt. <https://dnb.info/1192974905> <https://doi.org/10.36198/9783838552071>
- Lavie, T. & Tractinsky, N. (2004). Assessing dimensions of perceived visual aesthetics of web sites. *International Journal of Human-Computer Studies*, 60(3), 269–298. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2003.09.002>
- Leder, H. (1996). Line drawings of faces reduce configural processing. *Perception*, 25(3), 355–366. <https://doi.org/10.1068/p250355>
- Leder, H. (2001). Determinants of Preference: When do we like What we Know? *Empirical Studies of the Arts*, 19(2), 201–211. <https://doi.org/10.2190/5TAE-E5CV-XJAL-3885>
- Leder, H., Belke, B., Oeberst, A. & Augustin, D. (2004). A model of aesthetic appreciation and aesthetic judgments. *British journal of psychology (London, England : 1953)*, 95(Pt 4), 489–508. <https://doi.org/10.1348/0007126042369811>
- Leder, H., Hakala, J., Peltoketo, V.-T., Valuch, C. & Pelowski, M. (2022). Swipes and Saves: A Taxonomy of Factors Influencing Aesthetic Assessments and Perceived Beauty of Mobile Phone Photographs. *Frontiers in psychology*, 13, 786977. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.786977>
- Leder, H. & Nadal, M. (2014). Ten years of a model of aesthetic appreciation and aesthetic judgments : The aesthetic episode - Developments and challenges in empirical aesthetics. *British journal of psychology (London, England : 1953)*, 105(4), 443–464. <https://doi.org/10.1111/bjop.12084>
- Legrand, S., Vanmeert, F., van der Snickt, G., Alfeld, M., Nolf, W. de, Dik, J. & Janssens, K. (2014). Examination of historical paintings by state-of-the-art hyperspectral imaging methods: from scanning infra-red spectroscopy to computed X-ray laminography. *Heritage Science*, 2(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/2050-7445-2-13>
- Lenzner, A. (2009). *Visuelle Wissenskommunikation: Effekte von Bildern beim Lernen: Kognitive, affektive und motivationale Effekte* [, Fachbereich Psychologie der Universität Koblenz-Landau/ Campus Landau, Koblenz-Landau]. Original source.
- Lenzner, A., Schnotz, W. & Müller, A. (2013). The role of decorative pictures in learning. *Instructional Science*, 41(5), 811–831. <https://doi.org/10.1007/s11251-012-9256-z>
- Leutner, D. (2014). Motivation and emotion as mediators in multimedia learning. *Learning and Instruction*, 29, 174–175. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.05.004>
- Levin, J. R. (1989). A Transfer-Appropriate-Processing Perspective of Pictures in Prose. In H. Mandl & J. R. Levin (Hrsg.), *Advances in Psychology: Bd. 58. Knowledge acquisition from text and pictures* (Bd. 58, S. 83–100). North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62149-4](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62149-4)

- Li, C [Congcong] & Chen, T. (2009). Aesthetic Visual Quality Assessment of Paintings. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 3(2), 236–252.
<https://doi.org/10.1109/JSTSP.2009.2015077>
- Lindner, M. A. (2020). Representational and decorative pictures in science and mathematics tests: Do they make a difference? *Learning and Instruction*, 68(101345), 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2020.101345>
- Lindner, M. A., Lüdtke, O., Grund, S. & Köller, O. (2017). The merits of representational pictures in educational assessment: Evidence for cognitive and motivational effects in a time-on-task analysis. *Contemporary Educational Psychology*, 51, 482–492.
<https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2017.09.009>
- Locher, P. J. & Nodine, C. F. (1987). SYMMETRY CATCHES THE EYE. In J. K. O'Regan & A. Levy-Schoen (Hrsg.), *Eye movements: From physiology to cognition selected edited proceedings of the Third European Conference on Eye Movements, Dourdan, France, September 1985* (S. 353–361). North-Holland; Sole distributors for the U.S.A. and Canada Elsevier Science Pub. Co.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-70113-8.50051-5>
- Magdy, M. (2022). Insights into the Effect of UV Radiation on Paintings: A Mini-Review for the Asset Preservation of Artworks. *Advanced Research in Conservation Science*, 3(2), 46–54.
<https://doi.org/10.21608/arcs.2022.167664.1031>
- Maria Aufheimer. (2024). *DSUR.noof: Collection of Additional Functions Used in Andy Field's [Computer software]*.
- Mayer, R. E. (2005). Cognitive Theory of Multimedia Learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 31–48). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511816819.004>
- Mayer, R. E. (2024). The Past, Present, and Future of the Cognitive Theory of Multimedia Learning. *Educational Psychology Review*, 36(1), 1–25. <https://doi.org/10.1007/s10648-023-09842-1>
- McNaught, C. & Lam, P. (2010). Using Wordle as a Supplementary Research Tool. *The Qualitative Report*, 15(3), 630–643. <https://eric.ed.gov/?id=ej887905>
- Mikelskis-Seifert, S. & Duit, R. (2007). Physik im Kontext – Innovative Unterrichtsansätze für den Schulalltag, 60(5), 265–247.
- Miller, C. (2011). Aesthetics and e-assessment: the interplay of emotional design and learner performance. *Distance Education*, 32(3), 307–337.
<https://doi.org/10.1080/01587919.2011.610291>
- Molz, A. (2016). *Verbindung von Schülerlabor und Schulunterricht - Auswirkungen auf Motivation und Kognition im Fach Physik* [Dissertation, Technischen Universität, Kaiserslautern]. Original source.

- Moreno, R. (2006). Does the modality principle hold for different media? A test of the method-affects-learning hypothesis. *Journal of Computer Assisted Learning*, 22(3), 149–158. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.2006.00170.x>
- Moreno, R. & Mayer, R. E. (1999). Cognitive principles of multimedia learning: The role of modality and contiguity. *Journal of Educational Psychology*, 91(2), 358–368. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.91.2.358>
- Moreno, R. & Mayer, R. E. (2007). Interactive Multimodal Learning Environments: Special Issue on Interactive Learning Environments: Contemporary Issues and Trends. *Educational Psychology Review*, 19(3), 309–326. <https://doi.org/10.1007/s10648-007-9047-2>
- Moreno, R., Mayer, R. E., Spires, H. A. & Lester, J. C. (2001). The Case for Social Agency in Computer-Based Teaching: Do Students Learn More Deeply When They Interact With Animated Pedagogical Agents? *Cognition and Instruction*, 19(2), 177–213. https://doi.org/10.1207/S1532690XCI1902_02
- Moshagen, M. & Thielsch, M. T. (2010). Facets of visual aesthetics. *International Journal of Human-Computer Studies*, 68(10), 689–709. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2010.05.006>
- Muckenfuß, H. (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext: Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts*. Zugl.: Kurzfassung von: Weingarten, Pädag. Hochsch., Diss., 1995 (1. Aufl., 1. Dr). Cornelsen.
- Nascimento, S. M. C., Marit Albers, A. & Gegenfurtner, K. R. (2021). Naturalness and aesthetics of colors - Preference for color compositions perceived as natural. *Vision research*, 185, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2021.03.010>
- Nemiroff, R. & Bonnell, J. *Astronomy Picture of the Day*. ASD at NASA / GSFC, NASA Science Activation & Michigan Tech. U. <https://apod.nasa.gov/apod>
- Niegemann, H. M., Domagk, S., Hessel, S., Hein, A., Hupfer, M. & Zobel, A. (2008). *Kompendium Multimediales Lernen*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-37226-4>
- Oregon's Mt. Hood Territory. (2005). *Mount Hood reflected in Trillium Lake, Oregon: [Bild]*. Wikimedia Commons. <https://fhwaapps.fhwa.dot.gov/bywaysp/photos/62736>
- Pelagotti, A., L. Pezzati, N. Bevilacqua, V. Vascotto, V. Reillon & C. Daffara (2005). A study of UV fluorescent emission of painting material. *ART'05 8th International Conference on Non Destructive Investigations and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage*, 1–14. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-study-of-UV-fluorescent-emission-of-painting-Pelagotti-Pezzati/2584c99b642472eb178004e26cc677e79ae967c1>
- Peschke, L. (2017). *Infografiken: Visualität und Wissensaneignung in der mediatisierten Welt*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-23450-8>

- Peterson, M., Delgado, C., Tang, K.-S., Bordas, C. & Norville, K. (2021). A taxonomy of cognitive image functions for science curriculum materials: identifying and creating 'performative' visual displays. *International Journal of Science Education*, 43(2), 314–343. <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1868609>
- Pettersson, R. (2013). Aspekte der Verwendung von Bildern in Lehrbüchern. In G. Lieber (Hrsg.), *Lehren und Lernen mit Bildern: Ein Handbuch zur Bilddidaktik* (2., grundlegend überarbeitete und ergänzte Neuauflage, S. 134–145). Schneider-Verlag Hohengehren.
- Plass, J. L., Heidig, S., Hayward, E. O., Homer, B. D. & Um, E. (2014). Emotional design in multimedia learning: Effects of shape and color on affect and learning. *Learning and Instruction*, 29, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.02.006>
- Plass, J. L. & Kalyuga, S. (2019). Four Ways of Considering Emotion in Cognitive Load Theory. *Educational Psychology Review*, 31(2), 339–359. <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09473-5>
- Plass, J. L. & Kaplan, U. (2016). Emotional Design in Digital Media for Learning. In S. Y. Tettegah & M. Gartmeier (Hrsg.), *Emotions, Technology, Design, and Learning* (S. 131–161). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801856-9.00007-4>
- R Core Team. (2022). *R: A Language and Environment for Statistical Computing (Version 4.2.0) [Computer software]*.
- Rakoczy, K., Buff, A. & Lipowsky, F. (2005). Dokumentation der Erhebungs- und Auswertungsinstrumente zur schweizerisch-deutschen Videostudie "Unterrichtsqualität, Lernverhalten und mathematisches Verständnis". *Materialien zur Bildungsforschung*(13).
- Ramachandran, V. & Hirstein, W. (1999). The science of art: a neurological theory of aesthetic experience. *Journal of Consciousness Studies*, 6, 15–51. <https://www.ingentaconnect.com/content/imp/jcs/1999/00000006/f0020006/949>
- Reber, R., Winkielman, P. & Schwarz, N [Norbert] (1998). Effects of Perceptual Fluency on Affective Judgments. *Psychological Science*, 9(1), 45–48. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00008>
- Revelle, W. (2023). *How to: Use the psych package for factor analysis and data reduction*. <https://randilgarcia.github.io/smith-r-workshop/factor.pdf>
- Rey, G. D. (2012). A review of research and a meta-analysis of the seductive detail effect. *Educational Research Review*, 7(3), 216–237. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2012.05.003>
- Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53–65. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)

- Scharinger, C. (2023). Effects of emotional decorative pictures on cognitive load as assessed by pupil dilation and EEG frequency band power. *Applied Cognitive Psychology*, 37(4), 861–875. <https://doi.org/10.1002/acp.4087>
- Scherer, Verkühlen, A. & Dutke, S. (2023). Effects of related decorative pictures on learning and metacognition. *Instructional Science*, 51(4), 571–594. <https://doi.org/10.1007/s11251-023-09618-8>
- Scherer, R., Greiff, S. & Hautamäki, J. (2015). Exploring the Relation between Time on Task and Ability in Complex Problem Solving. *Intelligence*, 48, 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2014.10.003>
- Scheuermann, F. & Björnsson, J. (2009). The Transition to Computer-Based Assessment - New Approaches to Skills Assessment and Implications for Large-scale Testing, Artikel EUR 23679 EN. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.2788/60083>
- Schmidt, T. & Wolff, C. (2018). The Influence of User Interface Attributes on Aesthetics. *i-com*, 17(1), 41–55. <https://doi.org/10.1515/icom-2018-0003>
- Schmitt, N. (1996). Uses and abuses of coefficient alpha. *Psychological Assessment*, 8(4), 350–353. <https://doi.org/10.1037/1040-3590.8.4.350>
- Schneider, S. (2017). *The impact of decorative pictures on learning with media* [Dissertation]. Technische Universität Chemnitz.
- Schneider, S., Dyrna, J., Meier, L., Beege, M. & Rey, G. D. (2018). How affective charge and text–picture connectedness moderate the impact of decorative pictures on multimedia learning. *Journal of Educational Psychology*, 110(2), 233–249. <https://doi.org/10.1037/edu0000209>
- Schneider, S., Nebel, S. & Rey, G. D. (2016). Decorative pictures and emotional design in multimedia learning. *Learning and Instruction*, 44, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2016.03.002>
- Schwarz, N [N] (1990). Feelings as information: Informational and motivational functions of affective states!!! Passt fast. *Handbook of motivation and cognition: Foundations of social behavior*, 527–561. <https://psycnet.apa.org/record/1990-98254-015>
- Schweinberger, M., Watzka, B. & Girwidz, R. (2023). Eye tracking as feedback tool in physics teacher education. *Frontiers in Education*, 8, Artikel 1140272. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1140272>
- Shadish, W. R., Cook, T. D. & Campbell, D. T. (2002). *Experimental and quasi-experimental designs for generalized causal inference* (Bd. 1195). Houghton Mifflin. <https://iaes.cgiar.org/sites/default/files/pdf/147.pdf>

- Smith, L. F., Smith, J. K., Arcand, K. K., Smith, R. K., Bookbinder, J. & Keach, K. (2011). Aesthetics and Astronomy: Studying the Public's Perception and Understanding of Imagery From Space. *Science Communication*, 33(2), 201–238. <https://doi.org/10.1177/1075547010379579>
- Solso, R. L. (1994). *Cognition and the Visual Arts. A Bradford book*. MIT Press.
- Stark, L., Malkmus, E., Stark, R., Brünken, R. & Park, B. (2018). Learning-related emotions in multimedia learning: An application of control-value theory. *Learning and Instruction*, 58, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2018.05.003>
- Stark, L., Park, B. & Brünken, R. (2018). Emotionen beim Lernen mit Multimedia. In S. Ladel, J. Knopf & A. Weinberger (Hrsg.), *Digitalisierung und Bildung* (S. 141–158). Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-18333-2_8
- Steyer, R., Schwenkmezger, P., Notz, P. & Eid, M. (1997). *Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen (MDBF)*. Hogrefe. <https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/mehrdimensionaler-befindlichkeitsfragebogen-mdbf>
- Strijbosch, W., Vessel, E. A., Welke, D., Mitas, O., Gelissen, J. & Bastiaansen, M. (2022). On the Neuronal Dynamics of Aesthetic Experience: Evidence from Electroencephalographic Oscillatory Dynamics. *Journal of cognitive neuroscience*, 34(3), 461–479. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01812
- Tabachnick, B. G. & Fidell, L. S. (2013). *Using multivariate statistics* (6th ed.). Pearson Education.
- Um, E., Plass, J. L., Hayward, E. O. & Homer, B. D. (2012). Emotional design in multimedia learning. *Journal of Educational Psychology*, 104(2), 485–498. <https://doi.org/10.1037/a0026609>
- van der Kleij, F. M., Feskens, R. C. W. & Eggen, T. J. H. M. (2015). Effects of Feedback in a Computer-Based Learning Environment on Students' Learning Outcomes: A Meta- Analysis. *Review of Educational Research*, 85(4), 475–511. <https://doi.org/10.3102/0034654314564881>
- Vermeer, J. (1670–1672a). *De gitaarspeelster: [Öl auf Leinwand]*. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jan_Vermeer_van_Delft_013.jpg
- Vermeer, J. (1670–1672b). *Zittende Klavecimbelspeelster: [Öl auf Leinwand]*. Wikimedia Commons. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Johannes_Vermeer_-_Zittende_Klavecimbelspeelster_\(1673-1675\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Johannes_Vermeer_-_Zittende_Klavecimbelspeelster_(1673-1675).jpg)
- von Goethe, J. W. (1810). *Zur Farbenlehre* (1. Aufl.). Cotta. https://www.deutschestextarchiv.de/book/show/goethe_farbenlehre01_1810
- Werner, B. (2013). *Regenbogen-canim-lake: [Bild]*. Pixabay. <https://pixabay.com/de/photos/regenbogen-canim-lake-142701/>
- Wertheimer, M. (1923). Untersuchungen zur Lehre von der Gestalt. II. *Psychologische Forschung*, 4(1), 301–350. <https://doi.org/10.1007/BF00410640>
- Wiesner, H., Hopf, M. & Schecker, H. (2011). *Physikdidaktik kompakt*. Aulis Verlag.

- Wilson, A. & Chatterjee, A. (2005). The Assessment of Preference for Balance: Introducing a New Test. *Empirical Studies of the Arts*, 23(2), 165–180. <https://doi.org/10.2190/B1LR-MVF3-F36X-XR64>
- Xie, C. (2011). Visualizing Chemistry with Infrared Imaging. *Journal of Chemical Education*, 88(7), 881–885. <https://doi.org/10.1021/ed1009656>
- Xing, W., Huang, X., Li, C [Chenglu] & Xie, C. (2023). Teaching thermodynamics with augmented interaction and learning analytics. *Computers & Education*, 196, 104726. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2023.104726>
- Yang, X., Wang, F., Mayer, R. E., Hu, X. & Gu, C. (2023). Ocular foundations of the spatial contiguity principle: Designing multimedia materials for parafoveal vision. *Journal of Educational Psychology*, 115(8), 1125–1140. <https://psycnet.apa.org/record/2024-11125-001>
- Zapf, A., Castell, S., Morawietz, L. & Karch, A. (2016). Measuring inter-rater reliability for nominal data - which coefficients and confidence intervals are appropriate? *BMC Medical Research Methodology*, 16(1), 93. <https://doi.org/10.1186/s12874-016-0200-9>
- Zee, A. (2016). *Fearful symmetry: The search for beauty in modern physics* (New Princeton Science Library edition). Princeton University Press.
- Zeki, S. (1999). *Inner Vision: An Exploration of Art and the Brain*. <https://philpapers.org/rec/zekiv>

A. Anhang

Im Anhang sind weitere Diagramme und Tabellen der Auswertung enthalten, die im Hauptteil redundant wären. Zudem finden sich die Antworten der Probanden der Interviewstudie in diesem Kapitel.

A.1 Praktische Vorgehensweise bei der Auswahl der Bilder

Während in Kapitel 2.2, 2.3 und 4.1 die Reihenfolge der Kriterien nach der Relevanz für die Ästhetik geordnet waren, ist bei der Auswahl der Bilder die Stellenwert der Kriterien eine anderer Reihenfolge. Im Folgenden werden die Kriterien in der Reihenfolge präsentiert, die bei der Auswahl der ästhetischen Bilder (AP) in dieser Arbeit verfolgt wurden. Für die weniger ästhetischen Klassenzimmerexperiment Bilder (CEP) waren die Anforderungen insbesondere an den Bildinhalt und die Farbe zu speziell, sodass diese im Rahmen dieser Arbeit im Einklang mit den genannten Anforderungen eigenständig erstellt wurden.

Bildrechte

Bei der Bildauswahl wurde zunächst auf die Nutzungsrechte geachtet. Diese sollen mindestens dazu berechtigen, dass das Bild mit Autorennachweis gezeigt werden darf. Bei Webseiten, die auf den ersten Blick vielversprechende Bilder zeigen, wurde zunächst nach den Nutzungsrechten geprüft. Verschiedene Seiten, die potentiell ästhetische oder physikbezogene Bilder zeigen, folgen dabei unterschiedlichen Modellen. Im Folgenden wird eine nicht vollständige Liste von Websites vorgestellt, deren Bilder potentiell den weiteren Kriterien genügen könnten.

- Ein verständliches System sind die „*creative common*“ Lizenzen (CC), das Wikimedia Commons denen bei Wikimedia jedes Bild eine Zuordnung hat. Dabei gibt es folgende Zusätze, die kombiniert werden können: BY (Namensnennung des Urhebers erforderlich), SA (Weitergabe nur mit selbiger Lizenz), NC (keine kommerzielle Nutzung) sowie ND (Bild darf nicht geändert werden). Alle Zusätze der Lizenzen sind für den Unterricht passend, jedoch gibt es zu spezifischen Themenbereichen oft nur wenige Bilder zur Auswahl.
- Die „American Association of Physics Teachers“ (AAPT) führt jedes Jahr einen Fotowettbewerb durch, von dem die besten 100 Fotos auf ihren Websites gezeigt werden. Die Nutzung dieser Fotos ist nur im Unterricht ist erlaubt.
- NASA Für faszinierende Fotografien zum Themenbereich Astronomie eignet sich die Website der NASA. Bilder von der NASA sind für den Schulbereich erlaubt, sofern bei den Bildern nicht ein gesonderter Hinweis ist. Unabhängig davon sind die Bilder von

„astronomical picture of the day“ (APOD), einem Service der NASA. Für die Nutzung dieser Bilder muss der jeweilige Urheber kontaktiert werden.

- Okapia sowie „fundamental photographs“ beinhalten Bilder, die gleichzeitig ästhetisch sind und physikbezogenen Inhalte zeigen. Beide Websites legen allerdings eine „Rights-Managed Lizenz“ (RM) auf. Das bedeutet, dass ihre Nutzung Kosten verursacht.
- Das „earth science picture of the day“ (EPOD) hat Nutzungsrechte ähnliche zu CC NC. Bilder von EPOD dürfen explizit im Unterricht genutzt werden. Ein Vorteil von EPOD Plattform ist, dass die Bilder oft mit Erklärungen und Unterrichtsmaterialien zusammen veröffentlicht werden.
- Die Nutzungsrechte von Bildern auf Pixabay und Pexels sind ähnlich einer CC Lizenz. Für einen Gebrauch im Physikunterricht sind diese Bilder nutzbar. Allerdings ist die Suche nach einem passenden Bild nach den folgenden Kriterien eine Herausforderung, insbesondere hinsichtlich Inhalt.

Personen

Bilder mit Personen werden in dieser Arbeit als nicht relevant betrachtet.

Inhalt und Kontext

Es ist notwendig, dass das gewünschte physikalischen Phänomen im Bild gut sichtbar ist. Ebenso ist leicht der gewünschte Kontext einstellbar. Diese Begriffe können bei Websites mit einer Bildersuche als Stichworte dienen. Inhalte sollten einen Lehrplanbezug vorweisen.

Visuelle Komplexität und Farbe

Schließlich kommen die ästhetischen Kriterien an die Reihe. Bezüglich der Gestaltprinzipien wurde insbesondere auf die Trennung Vordergrund - Hintergrund Wert gelegt. Hier sind auch die weitere Gestaltprinzipien und die Komplexität mitentscheidend. Es wurde darauf geachtet, dass so wenige Objekte wie möglich im Bild erkennbar sind. Bilder mit zu wenigen Objekten kamen nach den oberen Ausschlusskriterien nicht vor. Ebenfalls wurde darauf geachtet, dass die physikalischen Objekte einen möglichst großen Bildanteil einnehmen. Weiterhin werden kräftige Farben bevorzugt sowie auf hohe Kontraste geachtet.

Symmetrie

Falls nach diesen Kriterien noch mehr als ein Bild zur Wahl stehen und das gewünschte Phänomen eine Symmetrie aufweist, wurde das Bild gewählt, das die Symmetrie des Phänomens am besten widerspiegelt.

A.2 Aufbereitung der Daten

Im Folgenden werden ergänzende Tabellen und Abbildungen der Auswertung gezeigt.

A.2.1 Histogramme für Items der subjektiven visuellen Ästhetik

Abbildung A.1 visualisiert die Item-Mittelwerte mit Standardfehler für die Themenbereiche Spektrum, Reflexion sowie Brechung. In den Histogrammen zu den Themenbereichen Reflexion und Brechung weisen die Items beim laePP als auch beim lafPP höhere Item-Mittelwerte bei dem APs im Vergleich zu dem CEPs auf. Die Item-Mittelwerte der CEPs liegen insbesondere außerhalb der Standardfehler der APs. Eine Ausnahme bildet lediglich das Item laePP_3 zur Klarheit. Daher ist es rechts der übrigen laePP Items angeordnet. Beim Themenbereich Spektrum erscheinen die Unterschiede zwischen AP und CEP nicht so deutlich wie bei den anderen Themenbereichen.

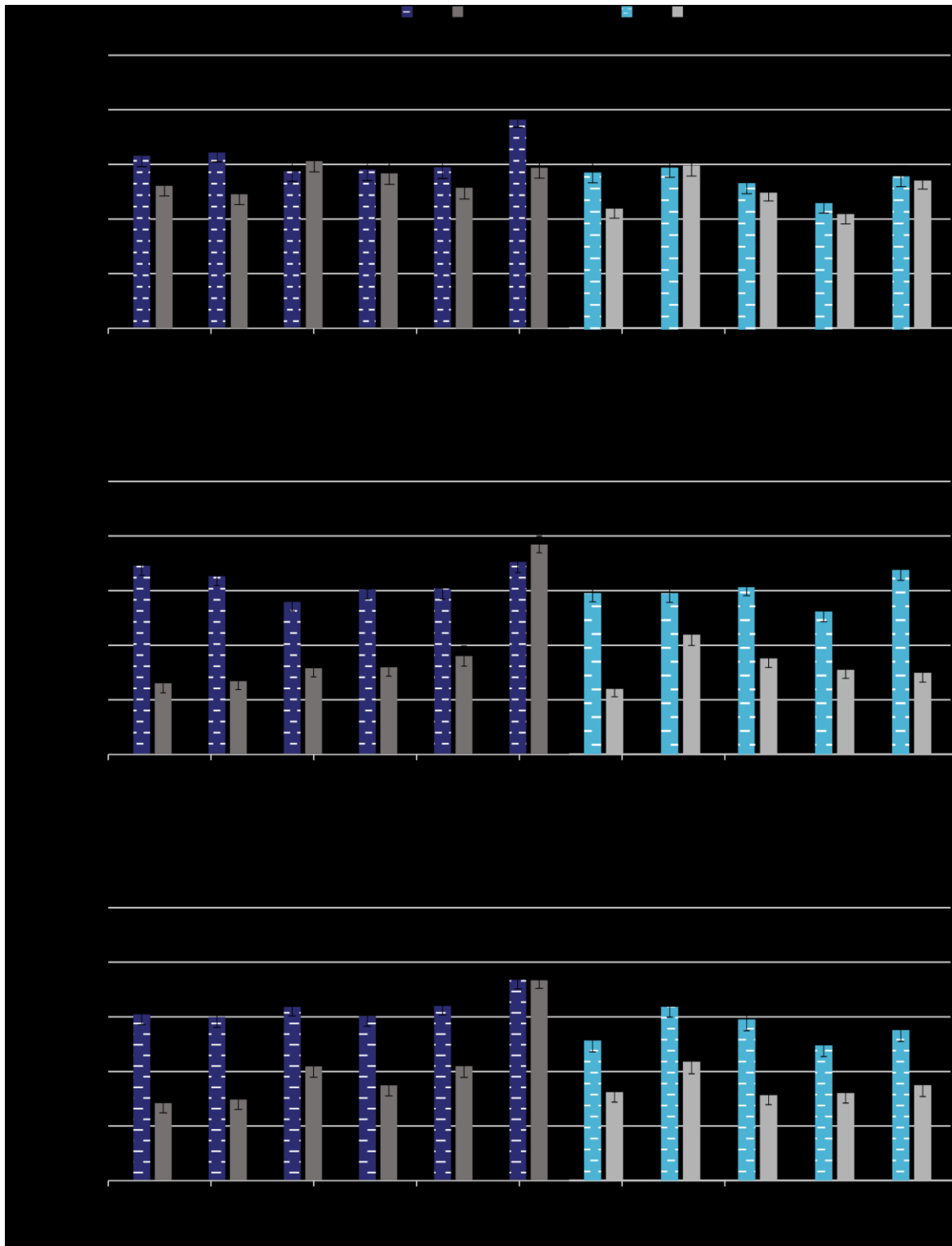


Abbildung A.1: Item-Mittelwerte mit Standardfehler für die Themenbereiche a) Spektrum, b) Reflexion, c) Brechung.

A.2.2 Korrelation von Item laePP_3

Die Tabelle A.1 zeigt die Korrelation des Items laePP_3 zu den anderen Items des laePP. Das Item laePP_3 zeigt, mit Ausnahme beim Themenbereich Spektrum, eine Korrelation zu den anderen Items von $<0,3$ an. Daher wird es von der weiteren Analyse ausgeschlossen, siehe Kapitel 5.1.

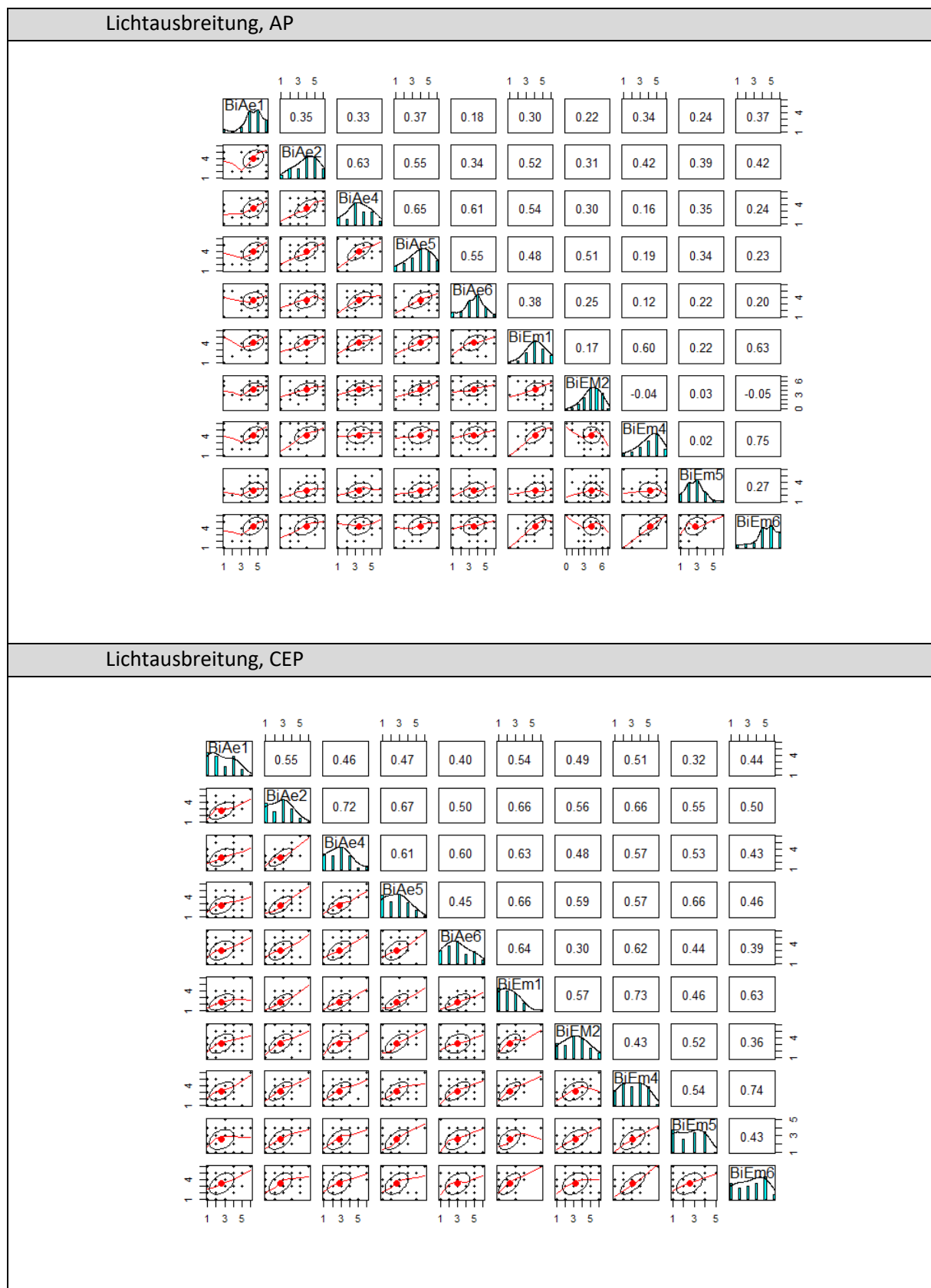
Tabelle A.1: Korrelationen des Items laePP_3 zu den anderen Items des laePP für die vier Themenbereiche.

Themenbereich	Bild Kategorie	M	SD	r_{it}
Lichtausbreitung	AP	4,2	1,1	0,1
	CEP	4,5	1,6	0
Spektrum	AP	4,6	1,2	0,4
	CEP	3,6	1,4	0,5
Reflexion	AP	4,5	1,4	0,2
	CEP	4,6	1,2	-0,3
Brechung	AP	4,7	1,4	0,2
	CEP	4,5	1,3	0,2

A.2.3 Vorbereitung Faktoranalyse: Prüfung der Normalität

Die Abbildungen in Tabelle A.2 zeigen exemplarisch für den Themenbereich Lichtausbreitung zusätzliche Informationen für die Itemanalyse der subjektiven visuellen Ästhetik: Unterhalb der Diagonalen sind bivariate Streuplots der Items dargestellt. Oberhalb der Diagonalen ist der Pearson'schen Korrelationskoeffizient zwischen den jeweiligen Items eingetragen. Die Histogramme auf der Diagonalen zeigen die jeweilige Verteilung der Antworten der Items. Mit bloßem Auge kann zwar nicht beurteilt werden, ob die Antworten für ein Item einer Normalverteilung genügen. Es kann jedoch geprüft werden, dass bei keinem Item eine extrem unregelmäßige, gleichförmige oder anormale Verteilung vorliegt.

Tabelle A.2: Voruntersuchungen für die Faktoranalyse der individuellen Item Bewertungen



A.2.4 Prüfung der Normalität der Probanden-Mittelwerte

Für die Auswertung der subjektiven visuellen Ästhetik wurde die Normalität der Probanden-Mittelwerte untersucht. Dafür wurde zunächst für jeden Probanden ein Mittelwert für die jeweilige Subskala bestimmt. Die Verteilung dieser Probanden-Mittelwerte zeigen folgende Abbildung A.2 bis Abbildung A.4. Aus diesen Verteilungen der Probanden-Mittelwerte wird ein Mittelwert gebildet, der die ästhetische bzw. affektive Bildwahrnehmung der APs und CEPs darstellt. Für die Varianzanalysen mit diesen Probanden-Mittelwerten für die Bildwahrnehmung muss die Art der Verteilung bekannt sein. Daher wird hier der Shapiro-Wilk-Test durchgeführt. In den folgenden Abbildungen sind neben den Histogrammen der Verteilungen auch die Teststatistiken des Shapiro-Wilk-Test gezeigt. In Grau sind Werte für $p < 0,01$ markiert, für dessen Bilder keine Normalverteilung nach dem Shapiro-Wilk-Test für die laePP bzw. lafPP vorliegt.

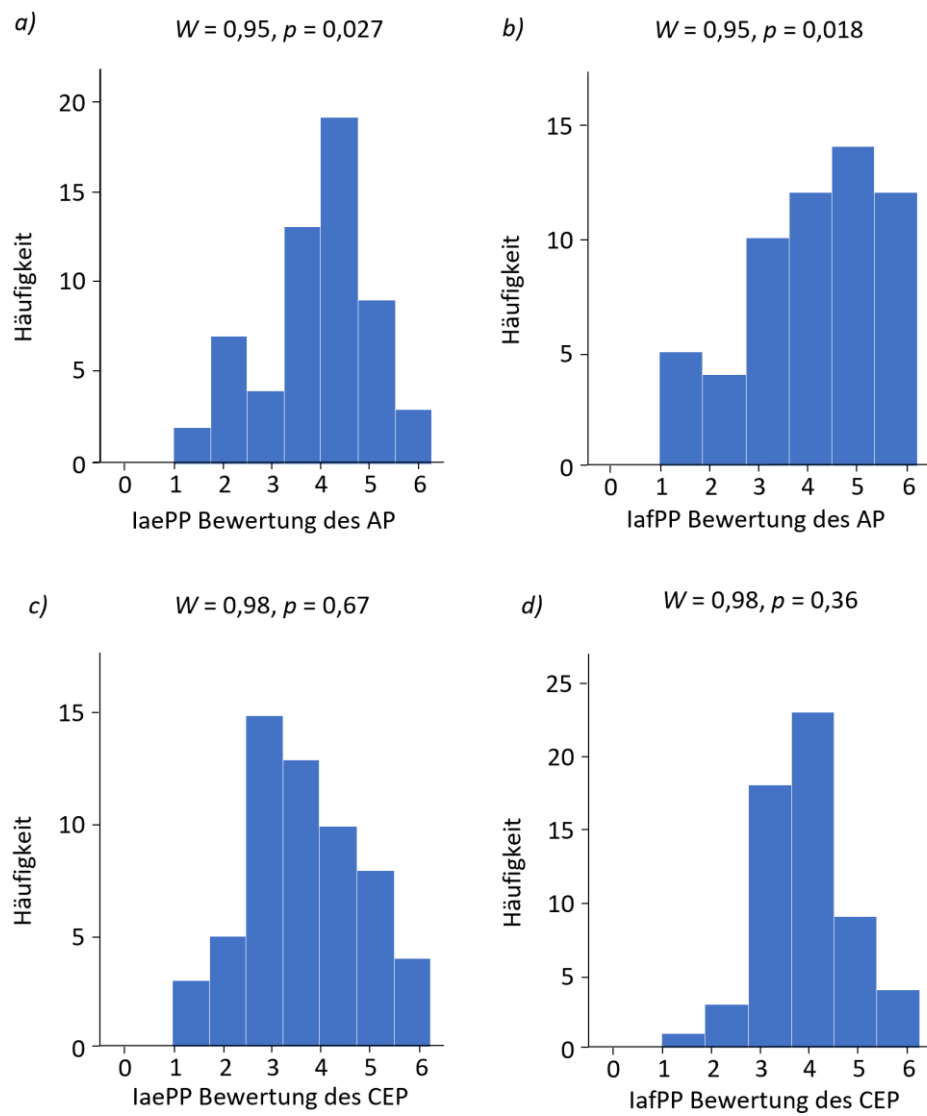


Abbildung A.2: Histogramme der Bewertung von laePP sowie lafPP des APs und CEPs zum Themenbereich Spektrum. a) zeigt das Histogramm zur laePP Bewertung des APs; b) das Histogramm zu lafPP Bewertung des APs; c) das Histogramm zu laePP Bewertung des CEPs; d) das Histogramm zu lafPP Bewertung des CEPs

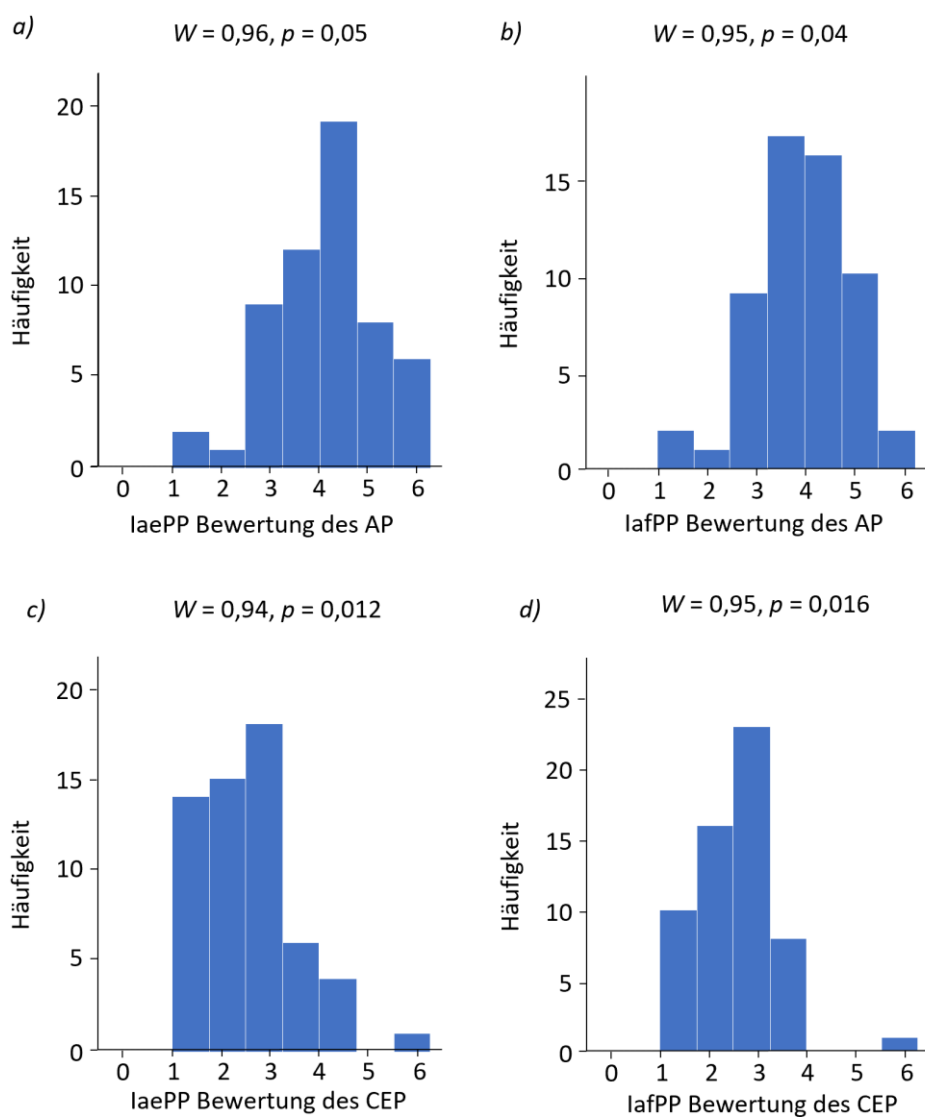


Abbildung A.3: Histogramme der Bewertung von laePP sowie lafPP des APs und CEPs zum Themenbereich Reflexion. a) zeigt das Histogramm zur laePP Bewertung des APs; b) das Histogramm zu lafPP Bewertung des APs; c) das Histogramm zu laePP Bewertung des CEPs; d) das Histogramm zu lafPP Bewertung des CEPs

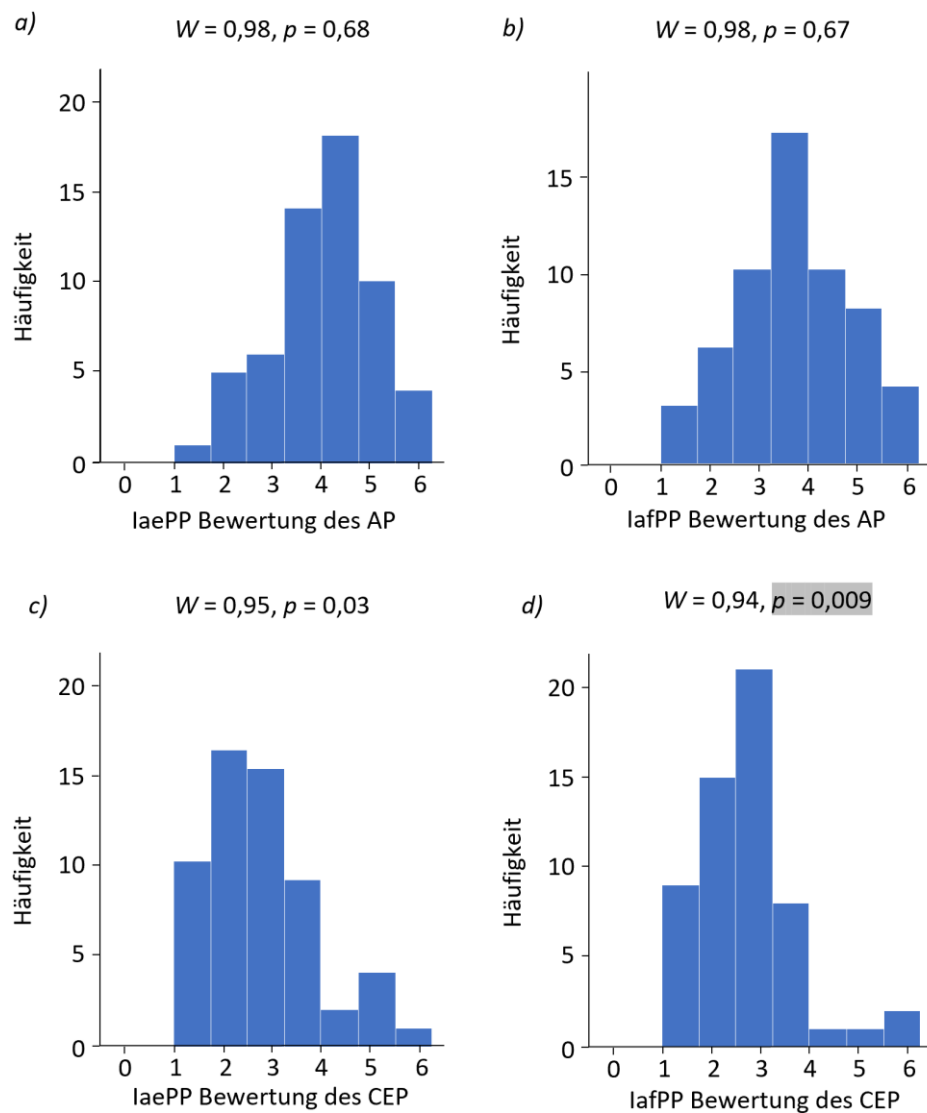


Abbildung A.4: Histogramme der Bewertung von laePP sowie lafPP des APs und CEPs zum Themenbereich Brechung. a) zeigt das Histogramm zur laePP Bewertung des APs; b) das Histogramm zu lafPP Bewertung des APs; c) das Histogramm zu laePP Bewertung des CEPs; d) das Histogramm zu lafPP Bewertung des CEPs.

A.2.5 Faktoranalyse: Silhouettenkriterium

Die Skala subjektive visuelle Bildästhetik wurde mit einer Faktorenanalyse untersucht. Dabei wurde zunächst die Dimensionalität der Skala bestimmt. Die zugehörigen Silhouettendiagramme zu den nicht im Hauptteil gezeigten Themenbereichen sind in der Folgenden Abbildung A.5 zu sehen. Bei Silhouettendiagrammen wird der höchste Silhouettenkoeffizient abgelesen, der optimalen Anzahl an Faktoren entspricht. Bei den folgenden Plots ist der höchste Silhouettenkoeffizient zweimal bei 2 Faktoren. Bei den übrigen vier Plots ist der zweite Faktor dreimal der zweithöchste Silhouettenkoeffizient. Der letzte Plot beschreibt die Skala beim CEP zum Themenbereich Brechung, jedoch zeigt das Clustering bei zwei Faktoren weiterhin einen guten Wert $> 0,5$. Somit kann eine Struktur mit zwei Faktoren für die Skala subjektive visuelle Bildästhetik vermutet werden.

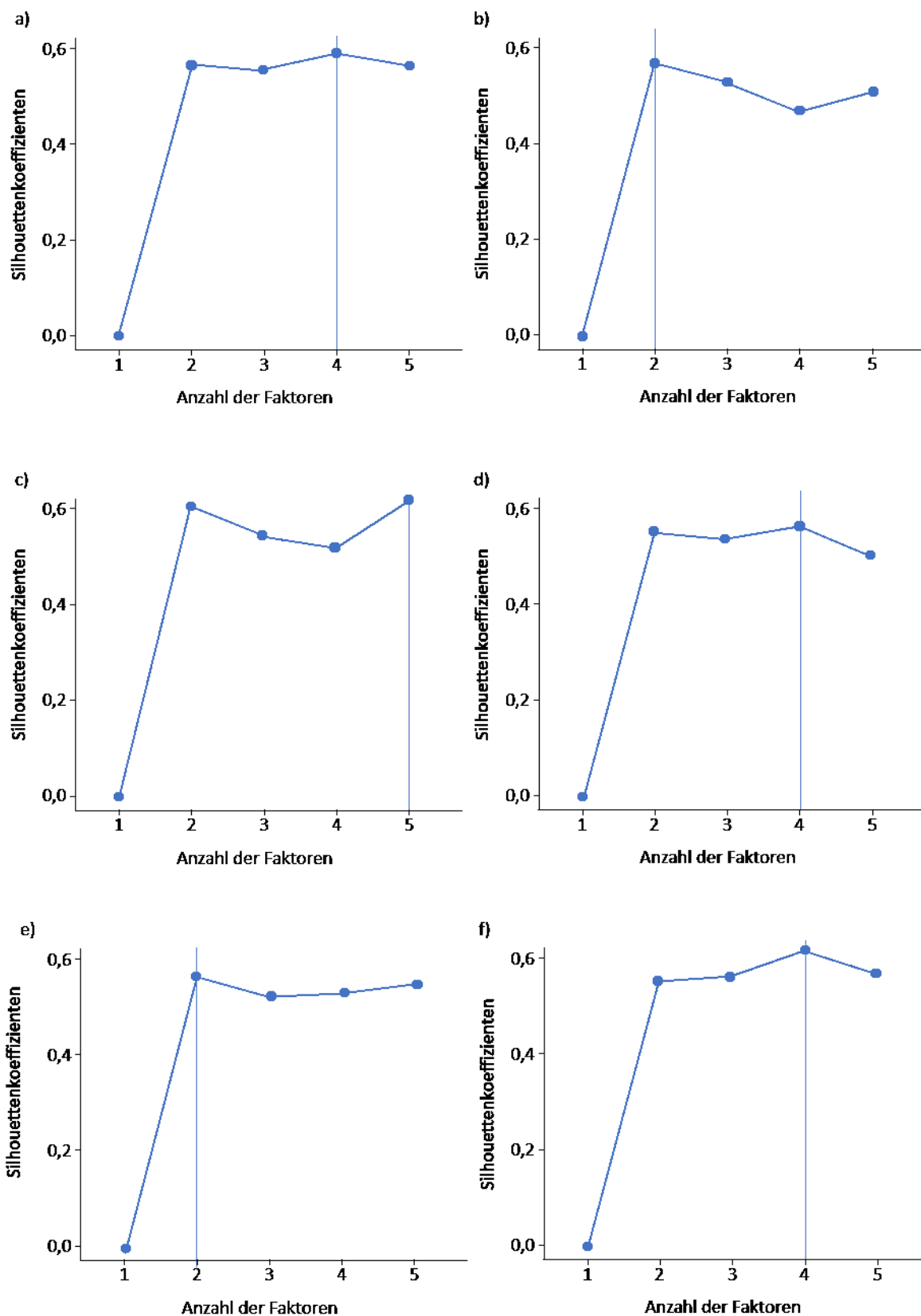


Abbildung A.5 Silhouettenkriterium für die im Hauptteil nicht gezeigten Bilder. Dabei zeigen a), c) e) das Silhouetten-Kriterium für die APs und b), d), f) für das zugehörige CEP; für die jeweiligen Themenbereiche Spektrum a), b), Reflektion c), d) und Brechung e) f).

A.2.6 Wissenstest Optik

Die Verteilung der der mittleren Punktzahl pro Aufgabe als Verteilung der Probanden im Prä- und Posttest ist im folgenden Violinendiagramm Abbildung A.6 visualisiert. Ein Violinendiagramm ist einem Box-Plot ähnlich, zeigt aber zusätzlich die Verteilung der Werte, hier über die Probanden, an.

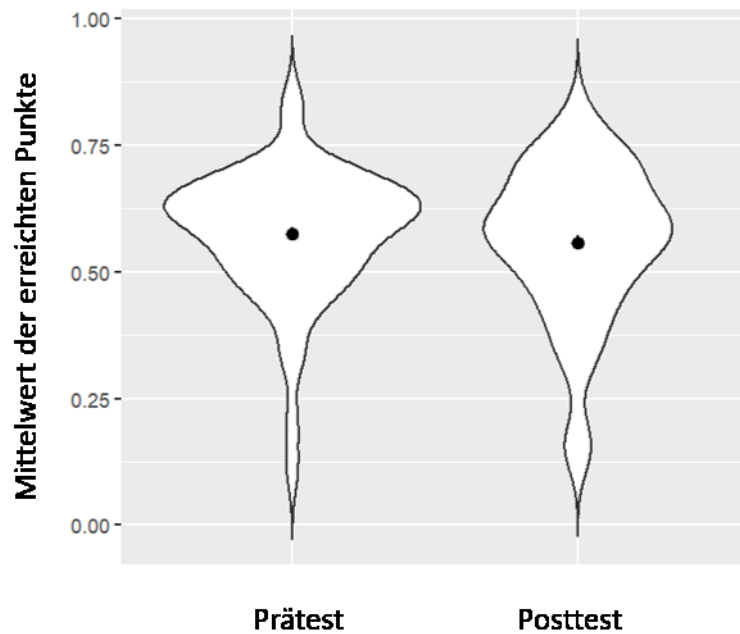


Abbildung A.6 Violinendiagramm mit Mittelwert zur Punkteverteilung in Prä- und Posttest.

Im Folgenden werden die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Beantwortung der einzelnen Aufgaben gezeigt. Die Mittelwerte entsprechen der Itemschwierigkeit. Während in Haupttext die Tabelle für den Themenbereich gezeigt wird, werden hier die Themenbereiche Lichtausbreitung (Tabelle A.3), Spektrum (Tabelle A.4) sowie Brechung (Tabelle A.5) gezeigt.

Tabelle A.3: Die Tabelle zeigt Mittelwert bzw. Itemschwierigkeit M , Standardabweichung SD , Korrelation zu den anderen Items R_{pbi} und Differenz zwischen den Mittelwerten von Prä- und Posttest für den Themenbereich Lichtausbreitung. Bei Mittelwerten und der Korrelation sind auffällige Zellen Orange eingefärbt. Die Differenz ist grün eingefärbt, falls sie positiv ist (mehr richtige Antworten im Posttest). $N_{AP} = 55$, $N_{CEP} = 54$.

Item Kürzel	Itemformulierung	Gruppe	Prätest			Posttest			Differenz zwischen Post- und Prätest
			M	SD	R_{pbi}	M	SD	R_{pbi}	
LiA_1	Eine Taschenlampe leuchtet auf eine Wand. Der Lichtstrahl ist dann nicht sichtbar, weil er sich vom Beobachter entfernt.	AP	0,65	0,48	0,41	0,44	0,50	0,37	-0,22
		CEP	0,78	0,42	#	0,67	0,48	0,35	-0,11
LiA_2	Lichtstrahlen sind etwas Wirkliches, so wie dünne Wasserstrahlen aus einer Spritzpistole.	AP	0,22	0,42	#	0,24	0,43	0,24	0,02
		CEP	0,43	0,50	0,38	0,43	0,50	0,15	0,00
LiA_3	Lichtstrahlen sind etwas Gedachtes, so wie Konstruktionen in der Geometrie.	AP	0,09	0,29	0,19	0,24	0,43	0,23	0,15
		CEP	0,28	0,45	0,45	0,33	0,48	0,08	0,06
LiA_4	Lichtstrahlen sind exakt das gleiche wie Lichtbündel.	AP	0,82	0,39	0,61	0,65	0,48	0,57	-0,16
		CEP	0,76	0,43	0,35	0,65	0,48	0,12	-0,11
LiA_5	Lichtbündel sind etwas Gedachtes, z.B. um die Bildgröße bestimmen.	AP	0,67	0,47	0,28	0,56	0,50	0,29	-0,11
		CEP	0,67	0,48	0,303	0,61	0,49	0,31	-0,06
LiA_6	Erst das an Gegenständen gestreute Licht trifft ins Auge und ist sichtbar.	AP	0,71	0,46	0,38	0,73	0,45	0,58	0,02
		CEP	0,74	0,44	0,16	0,63	0,49	0,56	-0,11
LiA_7	Die Tröpfchen streuen das Licht in alle Richtungen und das Licht trifft ins Auge.	AP	0,80	0,40	0,26	0,75	0,44	0,23	-0,05
		CEP	0,74	0,44	0,38	0,78	0,42	0,41	0,04
LiA_8	Die Tröpfchen wirken wie kleine Linsen, die das Licht bündeln.	AP	0,16	0,37	0,23	0,36	0,49	#	0,20
		CEP	0,39	0,49	0,10	0,30	0,46	0,14	-0,09
LiA_9	Die Tröpfchen sammeln das Licht und werden dadurch sichtbar.	AP	0,60	0,49	0,37	0,56	0,50	0,21	-0,04
		CEP	0,57	0,50	0,37	0,56	0,50	0,38	-0,02
LiA_10	Die Tröpfchen werden durch das auftreffende Licht durcheinandergewirbelt.	AP	0,91	0,29	0,21	0,71	0,46	0,18	-0,20
		CEP	0,96	0,19	0,40	0,74	0,44	0,34	-0,22

Tabelle A.4: Die Tabelle zeigt Mittelwert bzw. Itemschwierigkeit M , Standardabweichung SD , Korrelation zu den anderen Items R_{pbi} und Differenz zwischen den Mittelwerten von Prä- und Posttest für den Themenbereich Spektrum. Bei Mittelwerten und der Korrelation sind auffällige Zellen Orange eingefärbt. Die Differenz ist grün eingefärbt, falls sie positiv ist (mehr richtige Antworten im Posttest). $N_{AP} = 54$, $N_{CEP} = 55$.

Item Kürzel	Itemformulierung	Gruppe	Prätest			Posttest			Differenz zwischen Post- und Prätest
			M	SD	R_{pbi}	M	SD	R_{pbi}	
Spe_1	Unter einem Regenbogen kann man nicht durchgehen, weil er zu weit entfernt ist.	AP	0,59	0,50	#	0,43	0,50	0,05	-0,17
		CEP	0,51	0,50	0,36	0,62	0,49	0,32	0,11
Spe_2	Man kann den exakten Ort eines Regenbogens bestimmen.	AP	0,87	0,34	0,39	0,78	0,42	0,44	-0,09
		CEP	0,82	0,39	0,29	0,67	0,47	0,25	-0,15
Spe_3	Sonnenlicht wird durch Brechung an Regentropfen in Farben aufgespalten.	AP	0,78	0,42	0,29	0,78	0,42	0,30	0,00
		CEP	0,80	0,40	0,46	0,84	0,37	0,28	0,04
Spe_4	Unter einem Regenbogen kann man nicht durchgehen, weil er virtuell ist.	AP	0,50	0,50	0,20	0,48	0,50	0,56	-0,02
		CEP	0,44	0,50	0,32	0,56	0,50	0,38	0,13
Spe_5	Sonnenlicht wird durch Reflexion an Regentropfen in Farben aufgespalten.	AP	0,39	0,49	0,39	0,33	0,48	0,22	-0,06
		CEP	0,40	0,49	0,44	0,45	0,50	0,20	0,05
Spe_6	Sonnenlicht wird durch Reflexion an einem See oder im Meer in Farben aufgespalten.	AP	0,57	0,50	0,30	0,57	0,50	0,48	0,00
		CEP	0,62	0,49	0,52	0,53	0,50	0,37	-0,09

Tabelle A.5: Die Tabelle zeigt Mittelwert bzw. Itemschwierigkeit M , Standardabweichung SD , Korrelation zu den anderen Items R_{pbi} und Differenz zwischen den Mittelwerten von Prä- und Posttest für den Themenbereich Brechung. Bei Mittelwerten und der Korrelation sind auffällige Zellen Orange eingefärbt. Die Differenz ist grün eingefärbt, falls sie positiv ist (mehr richtige Antworten im Posttest). $N_{AP} = 54$, $N_{CEP} = 55$.

Item Kürzel	Itemformulierung	Gruppe	Prätest			Posttest			Differenz zwischen Post- und Prätest
			M	SD	R_{pbi}	M	SD	R_{pbi}	
Bre_1	Lichtstrahlen, die von einem Gegenstandspunkt ausgehen, werden durch die Sammellinse abgelenkt und treffen sich im Bildpunkt.	AP	0,56	0,50	0,61	0,69	0,47	0,16	0,13
		CEP	0,67	0,47	0,33	0,56	0,50	0,52	-0,11

Bre_2	Bei einer Sammellinse entsteht das Bild durch Spiegelung der Lichtstrahlen an der Linse.	AP	0,46	0,50	0,49	0,37	0,49	0,32	-0,09
		CEP	0,35	0,48	0,40	0,38	0,49	0,52	0,04
Bre_3	Eine Lochblende hat auf Licht eine ähnliche Wirkung wie eine Glaskugel.	AP	0,39	0,49	0,40	0,41	0,50	0,11	0,02
		CEP	0,18	0,39	0,22	0,33	0,47	0,41	0,15
Bre_4	Eine Sammellinse erzeugt ein aufrechtes Bild eines weit entfernten Gegenstandes.	AP	0,44	0,50	0,47	0,41	0,50	0,27	-0,04
		CEP	0,40	0,49	0,35	0,55	0,50	0,52	0,15
Bre_5	Eine Sammellinse stellt das Bild eines Gegenstandes auf den Kopf.	AP	0,57	0,50	0,37	0,78	0,42	0,55	0,20
		CEP	0,71	0,46	0,25	0,71	0,46	0,54	0,00
Bre_6	Eine Sammellinse hat auf Licht eine ähnliche Wirkung wie eine Glaskugel.	AP	0,61	0,49	0,37	0,56	0,50	0,31	-0,06
		CEP	0,75	0,44	0,33	0,60	0,49	0,61	-0,15
Bre_7	Eine Sammellinse vertauscht rechts und links bei dem Bild eines Gegenstandes.	AP	0,30	0,46	0,52	0,41	0,50	0,23	0,11
		CEP	0,29	0,46	0,18	0,49	0,50	0,53	0,20
Bre_8	Das Bild geht als Ganzes durch die Linse zum Schirm, dabei wird es in der Linse unter Einhaltung der Linsengesetze umgedreht (siehe Skizze).	AP	0,35	0,48	0,29	0,48	0,50	0,15	0,13
		CEP	0,25	0,44	0,19	0,45	0,50	0,37	0,20

A.3 Bewertungsschlüssel der Lernaufgaben

Art der Punktevergabe: Es wird eine positive Skala verwendet, das heißt Punkte werden pro erreichte Leistung gegeben. Die Lernaufgaben werden dazu in Teilaspekte zerlegt. Ein Teilaspekt entspricht einem Denkschritt. Für die Leistung eines Denkschritts wird ein halber Punkt vergeben.

Tabelle A.6 zeigt den aus diesen Überlegungen folgenden Bewertungsschlüssel.

Tabelle A.6: Die Tabelle zeigt in der ersten Spalte die Kürzel der einzelnen Lernaufgaben. Unter dieser Nummer sind die Lernaufgaben auch in der Lernumgebung aufgeführt. In der Spalte Arbeitsaufforderung ist der jeweilige Arbeitsauftrag mit Operator angegeben. Teilweise ist weiterer Aufgabentext zum besseren Verständnis gegeben. Die dritte Spalte gibt die maximal erreichbare Punktzahl an. In der letzten Spalte wird spezifiziert, nach welchen Kriterien diese Punkte verteilt werden.

Kürzel der Aufgabe	Arbeitsaufforderung	Punkte	Bewertungskriterien
Lichtausbreitung			
LA1	Gib die Lichtquelle an!	1 P	1 P richtig, 0 P falsch
LA2	Nenne drei andere Lichtquellen aus deinem Alltag!	1,5 P	0,5 P für jede richtige Nennung
LA3	AP: Stelle eine Vermutung auf, zu welcher Zeit dieses Foto aufgenommen wurde! CEP: Nenne zwei Gegenstände, die du auf dem Foto erkennen kannst.	1 P	AP: morgens <i>oder</i> abends 0,5 P, morgens <i>und</i> abends 1 P CEP: Pro Gegenstand 0,5 P
LA4	Gib die Punkte an, die die Lampe beleuchtet!	2 P	0,5 P für jede richtig getippte Antwort (es gibt Punkte für auf Richtiges geklickt sowie für auf Falsches nicht geklickt)
LA5	Welche drei Objekte sind nötig um einen Schatten zu erzeugen? Klicke sie an!	3 P	1 P für jede richtige Nennung
LA6	Unter welchen Bedingungen entstehen Schatten und welche Objekte sind nötig? Ziehe die Objekte in die betreffenden Felder!	4 P	1 P für jedes richtige Paar, bei dem die Komponenten in der richtigen Spalte sind. 0,5 P für richtige Paare, bei denen die Komponenten vertauscht sind
LA7	AP: Wie sieht das Foto mittags bei trockener Luft aus? Begründe deine Antwort! CEP: Nenne Unterschiede zum ersten Bild!	2 P	AP: 1 P Foto ohne sichtbare Lichtstrahlen 1 P trocken-> Streuung weniger 1 P Lichtstrahl allgemein nicht sichtbar CEP: 1 P nur ein Gegenstand 1 P zwei Lichtquellen 1 P Schirm senkrecht/andere Perspektive
LA8	Nenne drei undurchsichtige Gegenstände, die Schatten werfen!	1,5 P	0,5 P pro richtiger Nennung (eine „Wand“ ist kein Gegenstand, der Schatten wirft)
LA9	Nenne zwei durchsichtige Gegenstände oder Materialien, durch die Licht geradlinig verläuft!	1 P	0,5 P pro Nennung

LA10	Beschreibe einen Versuch, an dem du die geradlinige Ausbreitung der Lichts erkennen kannst!	3 P	1 P Lichtquelle 1 P Streuzentren (ein Wassereimer ist kein Streuzentrum) 1 P Schirm
<i>Spektrum</i>			
RB1	Nenne die Lichtquelle auf dem Foto!	1 P	1 P richtig, 0 P falsch
RB2	Gib auch die Farbe der Lichtquelle an!	1 P	1 P richtig, 0 P falsch
RB3	Gib vier Farben an, die du im Regenbogen siehst!	2 P	0.5 P pro richtiger Farbe
RB4	Nenne die Rolle des Wasserbads auf dem Overheadprojektor/der Tröpfchen in der Regenwand bei der Entstehung des Regenbogens	1 P	1 P richtig, 0 P falsch
RB5	Welches Wetter: Erläutere, bei welchem Wetter das war.	1 P	Sonne 0,5 P Regen 0,5 P
RB6	Stelle dir vor du stehst so, dass du den Regenbogen genau vor dir siehst. Wo befindet sich dann die Sonne?	1 P	1 P richtig, 0 P falsch
RB7	Nenne eine weitere Möglichkeit oder ein Experiment, bei dem weißes Licht durch Wasser in Regenbogenfarben zerlegt	2 P	1 P für Tropfenform des Wassers*, 1 P für Lichtquelle
<i>Reflexion</i>			
RE1	AP: Nenne drei verschiedene Objekte, die du sowohl in echt als auch gespiegelt im See siehst! CEP: Beschreibe, was du sowohl in „echt“ als auch gespiegelt siehst!	1.5 P	AP: 0,5 P pro Objekt, dass es sowohl in echt als auch gespiegelt gibt CEP: 0,5 P Spiegel erkennen, 0,5 P Buchstabe, 0,5 P gespiegelter Buchstabe
RE2	AP: Wähle Objekte aus, die du in der rechten Bildhälfte siehst! CEP: Wähle die Objekte aus, die du rechts der blauen Linie siehst!	3 P	0,5 P pro richtige Antwort AP hat vier richtige Antworten, CEP vier falsche Antworten (hier auch für falsche Antwort nicht ankreuzen 0,5 P geben)
RE3	AP: Wähle Objekte aus, die du in der linken Bildhälfte siehst! CEP: Wähle die Objekte aus, die du links der blauen Linie siehst!	2 P	0,5 P pro richtige Antwort (für falsche Antwort nicht ankreuzen auch 0.5 P geben)
RE4	Bilde Paare mit Objekten aus dem Physikunterricht und den jeweils dazu passenden Objekten aus dem Foto.	3P	1 P für jedes richtige Paar, bei dem die Komponenten in der richtigen Spalte sind. 0,5 P für richtige Paare, bei denen die Komponenten vertauscht sind
RE5	AP: Nenne zwei Objekte, die du jeweils oberhalb des Sees und „im“ See siehst! CEP: Nenne zwei Objekte, die du im Foto siehst!	2 P	Je richtiges Objekt 1 P

RE6	Welche Aussagen treffen zu? Kreuze an! Das Spiegelbild des Bergs/Stifts ist ...	2,5 P	0,5 P pro richtige Antwort (für falsche Antwort nicht ankreuzen auch 0.5 P geben)
RE7	Fülle die Lücken aus!	3 P	Lücke 1 und 2 je 1 P, Lücke 3 und 4 zusammen 1 P
Brechung			
Sam1	Nenne das optische Element und ein abgebildetes Objekt, das du in diesem Foto siehst!	1 P	0,5 P für jeweils Objekt und Element
Sam2	Gib auch hier das optische Element und einen abgebildeten Gegenstand an!	1 P	0,5 P für jeweils Objekt und Element
Sam3	Vergleiche nun den Versuch im Unterricht mit dem Ereignis auf den Fotos, indem du die folgende Tabelle vervollständigst.	3 P	0,5 P pro richtig angeordnetes Element
Sam4	Vervollständige die Merksätze!	4 P	1 P pro Lücke, aber 3. und 4. Lücke ergeben zusammen 1 P
Sam5	Finde den Fehler und beschreibe ihn!	2 P	1 P identifiziert wo der Fehler liegt 1 P identifiziert was falsch ist

* RB7: Garten/Wasserschlauch: Hier wurde doch einen Punkt für die Begriffe „Gartenschlauch“ bzw. „Wasserschlauch“ gegeben. Man kann davon ausgehen, dass ein Wasserschlauch Wasser Tröpfchen produziert. Das ist üblich und selbstverständlich. Es ist in der Frage nicht nach der Erklärung des Versuches/Experiments gefragt, sondern nur nach einer Beschreibung. Interessante Antworten dieser Aufgabe: Es wird einige Male „Prisma“ genannt. Die Nennung ist vereinzelt und kommt in jeder Klasse ein bis zweimal vor. Es gibt trotzdem keinen Punkt dafür, da ein Prisma nicht aus Wasser besteht. Die Klasse am Wilhelmsgymnasium hat ein Experiment gemacht, dass bei ihnen zwar schon ein Jahr her ist, jedoch haben sich doch einige Probanden daran erinnert: Ein hohles Prisma wurde mit Wasser gefüllt und danach mit einer Taschenlampe angeleuchtet. Einige der Probanden nennen hier auch das mit Wasser gefüllte Prisma. Für die Nennung von Wasserdampf gibt es ebenfalls keinen Punkt.

A.4 Interviewstudie

Im Folgenden sind die Stichworte der Antworten der Probanden gezeigt. Zunächst sind in Tabelle A.7 die Erklärungen für die Abkürzungen für die darauffolgenden Tabelle A.9 bis Tabelle A.14. Die Interviewstudien wurden zum einen mit Schülerinnen und Schülern durchgeführt, die zu Besuch am Lehrstuhl waren (I_SF_1 bis I_SF_8). Zum anderen wurden Nachhilfeschülerinnen und Schüler (I_LB_1 bis LB_10) befragt. Als Teil einer Zulassungsarbeit wurden hier zusätzlich Fragen zum Interesse gestellt, die in der vorliegenden Arbeit nicht ausgewertet wurden, jedoch zur Vollständigkeit in Tabelle A.8 gezeigt werden.

Tabelle A.7: Schlüssel für die Zuordnung der Bilder zu ihrer Nummerierung.

Themenbereich	Bildkategorie	Bildnummer
Lichtausbreitung	AP	1a
	CEP	1b
Spektrum	AP	2a
	CEP	2b
Reflexion	AP	3a
	CEP	3b
Brechung	AP	4a
	CEP	4b

Zusätzlich gibt es für die Interviewprobanden I_LB_1 bis LB_10 Einblicke zum Interesse:

Tabelle A.8: Demografische Daten und Interesse der Probanden I_LB

# Interview-proband	Letzte Physiknote	Würdest du den Physikunterricht als interessant bezeichnen?	Beschäftigst du dich außerhalb der Schule mit Physik	Hast du Erfahrung mit Fotografie?
I_LB_1	2	Ja	Ja, Lupe als Brennglas	Nein
I_LB_2	4	Ja	Nein	Nein
I_LB_3	2	Ja	Nein	Nein
I_LB_4	3	Ja	selten, Gespräche	Nein
I_LB_5	1,5	Ja	Ja, Relativitätstheorie	Nein
I_LB_6	3	Nein	Nein	Nein
I_LB_7	1	Ja	Ja, Nachrichten, Tornado, Regenbogen, Experimente zuhause	Nein
I_LB_8	2	Ja	Nein	Nein
I_LB_9	3	Nein	Nein	Nein
I_LB_10	1	Ja	Ja, Internetrecherche bei Phänomenen im Alltag	Nein

Vor den ersten Fragen konnten die Probanden in Ruhe alle Bilder betrachten. Die ersten Fragen sind sehr offen gestellt, sodass den Antworten freien Lauf gelassen wurde.

Tabelle A.9: Antworten der Probanden zu den Fragen nach ihren ersten Eindrücken der Bilder.

Frage	Proband	Bild	Antwort in Stichworten
1. Welches Bild gefällt dir am besten?	I_SF_1	1a	
	I_SF_2	1a	
	I_SF_3	4a	
	I_SF_4	3a	
	I_SF_5	3a	
	I_SF_6	1a	
	I_SF_7	3a	
	I_SF_8	4a	
	I_LB_1	3a	
	I_LB_2	3a	
	I_LB_3	4a	
	I_LB_4	1a	
	I_LB_5	3a	
	I_LB_6	1a	
	I_LB_7	3a	
	I_LB_8	4a	
	I_LB_9	1a	
	I_LB_10	2a	
2. Was gefällt dir an dem Bild?	I_SF_1	1a	Farben, Wolken
	I_SF_2	1a	Sonnenuntergang, Strand, Strahlen
	I_SF_3	4a	Schön, fasziniert dass Landschaft in der Kugel umgedreht
	I_SF_4	3a	Schöne Landschaft
	I_SF_5	3a	Schöne Farben, Landschaft
	I_SF_6	1a	Schöne Farben Meer
	I_SF_7	3a	Spiegeln, Scharfes Bild; Berge, also Motiv
	I_SF_8	4a	Es ist einfach toll, keine Ahnung warum es mir gefällt (nach zeigen von 4b) mehr Farbe, Natur, interessant
	I_LB_1	3a	"1 zu1" genau gespiegelt, trotz komplexität
	I_LB_2	3a	Inhalt Natur
	I_LB_3	4a	Interessant
	I_LB_4	1a	Erinnert an Urlaub
	I_LB_5	3a	Naturelemente
	I_LB_6	1a	Sonnenuntergang plus Meer, schöne Farben
	I_LB_7	3a	Natur
	I_LB_8	4a	schöne Natur, kreativ

	I_LB_9	1a	fühlt sich nach Urlaub an
	I_LB_10	2a	Im Alltag bringt Glück
3. Was genau gefällt dir nicht an dem Bild?	I_SF_1	1b	Farben langweilig, weil symmetrisch nicht viel zu sehen
	I_SF_2	1a	Einsamer Mensch (<i>unten im Bild</i>)
	I_SF_3	4b	Nicht Natur, so einfarbig blau
	I_SF_4	3b	Boden nicht schön
	I_SF_5	3b	langweilig
	I_SF_6	1b	ist in jedem Schulbuch
	I_SF_7	3b	Langweilig Schwarz-weiß Assoziation Klo
	I_SF_8	4b	alles
	I_LB_1	1a	Keine kräftigen Farben, Schatten wenig Kontrast, nicht gut erkennbar
	I_LB_2	3b	zu langweilig, farblos
	I_LB_3	1b	Es sieht leer aus
	I_LB_4	4b	Sieht nicht gut aus
	I_LB_5	4b	eintönig, wenig komplex
	I_LB_6	3b	unkreativ, nur ein Gegenstand
	I_LB_7	2b	man versteht das dargestellte nicht
	I_LB_8	4b	viele Geräte, nicht mittig
	I_LB_9	4b	nur zwei Farben
	I_LB_10	4b	man erkennt nicht, wie der Regenbogen entsteht

Als nächsten Teil ging es genauer um die Bildinhalte. Hier wurde gefragt, ob die Probanden erkennen, welche Phänomene auf den Bildern dargestellt werden. Die Probanden I_SF bekamen dazu ein AP ausgewählt, auf das sie sich beziehen sollten. Die Probanden I_LB sollten sich jeweils auf ein Bildpaar zu einem Themenbereich beziehen. Sie bekamen eine zusätzliche Nachfrage, bei welcher Bildkategorie sie das physikalische Phänomen besser erkennen können.

Tabelle A.10: Antworten der Probanden bezüglich der gezeigten physikalischen Phänomene

Frage	Proband	Bild	Antwort in Stichworten	
4. a) Welche physikalischen Phänomene erkennst du im Bild?	I_SF_1	1a	Lichtstrahlen abgeblockt von Wolken /Blöcke	
	I_SF_2	1a	Vielleicht Sonnenstrahlen, habe keine Ahnung, Spiegeln	
	I_SF_3	4a	Sammellinse	
	I_SF_4	3a	Spiegelung	
	I_SF_5	3a	Spiegelung	
	I_SF_6	1a	Schatten	
	I_SF_7	3a	Gespiegelt	
	I_SF_8	4a	umgedreht	
	I_LB_1	3	Spiegelung	
	I_LB_2	2	Regenbogen	
	I_LB_3	1	Schatten	
	I_LB_4	4	Linse	
	I_LB_5	2	Regenbogen	
	I_LB_6	1	Lichtausbreitung/Schatten	
	I_LB_7	4	Brechung an der Linse	
	I_LB_8	2	Regenbogen	
	I_LB_9	2	Regenbogen	
	I_LB_10	3	Spiegelung, Reflexion	
4b) Bei welcher Bildkategorie kannst du das Phänomen besser erkennen?	I_LB_1	3	b	Einfachheit
	I_LB_2	2	a	Alltagsbezug
	I_LB_3	1	b	Einfachheit, Klarheit
	I_LB_4	4	b	Klarheit
	I_LB_5	2	b	Einfachheit, Klarheit
	I_LB_6	1	b	Einfachheit, Klarheit
	I_LB_7	4	b	Einfachheit, bei 4a zu viele Objekte
	I_LB_8	2	a	Alltagsbezug
	I_LB_9	2	a	Alltagsbezug
	I_LB_10	3	b	Einfachheit

Als nächstes wurden affektive Aspekte zu den Bildern abgefragt. Mit den Begriffen „beruhigend“ und „gelangweilt“ wird Bezug auf die Items lafPP6 und lafPP2 (ruhig und schläfrig) thematisch aufgegriffen.

Tabelle A.11: Antworten der Probanden zu affektiven Faktoren der Bilder.

Frage	Proband	Bild	Antwort in Stichworten
5. Manche SuS finden das Bild beruhigend. Dieses Bild finden SuS weniger beruhigend. Stimmt du dem zu? 6. Kannst du das erklären/begründen?	I_SF_1	4	Schon so 4b eher Schule Assoziation 4a mehr zu sehen
	I_SF_2	4a	Ich weiß nicht was mich beruhigt Sieht halt nach Natur aus, ich bin viel Zuhause, das Bett beruhigt mich
	I_SF_3	3	3a ist real, 3a ist cooler ein F zu spiegeln ist lebensfern.
	I_SF_4	3	3a) Natur ist schön, da denkt man an gute Luft, 3b) erinnert an Protokolle, negative Assoziationen
	I_SF_5	1b	Man weiß worum es geht
	I_SF_6	1	Ja. Leicht zu verstehen
	I_SF_7	4	Ja schon beruhigend Wunsch in die Natur zu gehen Urlaub ist eher entspannend
	I_SF_8	3	Weiß nicht Wenn ich das in der Schule sehe, will ich aus der Schule raus (Frage ob sie lieber mit anderem Bild in der Schule arbeiten würde) lieber mit dem Bild 3a als 3b arbeiten, dann doch motivierend
	I_LB_1	2b	Nein Naturbilder sind beruhigender
	I_LB_2	3b	Nein ästh. Bild beruhigender Natur - > trockene Bilder
	I_LB_3	1b	Ja keine Ablenkung
	I_LB_4	1b	Ja klarer Schatten
	I_LB_5	3b	Ja Symmetrie beruhigt
	I_LB_6	4b	Nein unsymmetrisch
	I_LB_7	1b	Ja sieht wenig Objekte
	I_LB_8	4b	Nein nicht symmetrisch
	I_LB_9	3b	Ja wenig Objekte lenken ab
	I_LB_10	1b	Ja symmetrisch
7. Wenn ich nach gelangweilt gefragt habe, waren SuS hier nicht im Einklang mit ihren anderen Antworten. Was meinst du dazu?	I_SF_1	2b	Regt nicht zum Denken an
	I_SF_2	3b	Nur einfach wenig drauf Wenig Farben, düster 3a fröhlich, mehr Farben
	I_SF_3		Ist nicht realistisch, cooler, weil echt
	I_SF_4	1	1b nur an Schule (?) 1a erinnert an Schwimmen
	I_SF_5	1b	Würde man sich nicht aufhängen Wurde gestellt das man erklären kann

	I_SF_6	3	Kennt man schon Hat gleich Beispiel wo das Phänomen vorkommt	
	I_SF_7	1a	Wille dort zu sein kann sich vorstellen es lange anzuschauen an sich schön	
	I_SF_8	1a	Keine Ahnung ich will hin beruhigend Kann man einfach anschauen und dann einschlafen	
	I_LB_1	2b	ja	das andere ist lebhafter, Alltagsbezug Natur
	I_LB_2	3b	Ja	wenig zu sehen
	I_LB_3	1b	Ja	man sieht wenig
	I_LB_4	1b	Nein	sieht gut aus, Symmetrie
	I_LB_5	3b	Nein	Reflexion weckt Interesse
	I_LB_6	4b	Ja	nur Gegenstände/Experiment
	I_LB_7	1b	Nein	zeigt gut Schatten
	I_LB_8	4b	Ja	Experiment ist langweilig
	I_LB_9	3b	Ja	wenig gespiegelt
	I_LB_10	1b	Ja	wenig zu sehen

Anschließend wurden weitere affektive Aspekte abgefragt. Mit den genutzten Begriffen „wach“, „glücklich“, „müde“, „unglücklich“ wird Bezug auf die Items IafPP5 und IafPP1 genommen. Des Weiteren wurden die Probanden I_LB nach allgemein nach Emotionen gefragt.

Tabelle A.12: Antworten der Probanden zu konkreten Emotionen.

Frage	Proband	Bild	Antwort in Stichworten
8. a) Inwiefern könntest du sagen, dass dich das Bild wach / glücklich oder müde / unglücklich macht?	I_SF_1	2	2a macht glücklicher als 2b
	I_SF_7	1b	Düster, statt wach
	I_SF_8	1b	<i>Zu wach:</i> wo bin ich im Foto- wenn ich mir vorstelle, dass ich von der Lampe im Foto direkt bestrahlt werde- wach, wenn ich mir vorstelle, dass ich im Schatten der Klötze bin, bin ich müde
	I_LB_1	3a	ist sehr lebhaft
	I_LB_2		Ja, ästh. Bild. Viel Farbe
	I_LB_3		Nein
	I_LB_4		Ja, beide
	I_LB_5		Nein
	I_LB_6		Nein
	I_LB_7	1a	fühlt sich wach, wenn die Sonne scheint

	I_LB_8	4a	Natur
	I_LB_9	3a	
	I_LB_10	1a	Farbe
8. b) positive Emotionen	I_LB_1	2a	Neugier, Bewunderung
	I_LB_2	3a	Freude, Bewunderung, Staunen
	I_LB_3	1a	Staunen
	I_LB_4	1a	Freude
	I_LB_5	3a	Neugier, Freude
	I_LB_6	4a	Bewunderung, Staunen
	I_LB_7	1a	Neugier, Staunen
	I_LB_8	4a	Freude, Bewunderung, Staunen
	I_LB_9	3a	Freude
	I_LB_10	1a	Staunen
8. c) Negative Emotionen	I_LB_1	2b	Trauer
	I_LB_2	3b	Angst, Ekel
	I_LB_3	1b	Neugier
	I_LB_4	1b	Neugier
	I_LB_5	3b	Wut
	I_LB_6	4b	Staunen
	I_LB_7	1b	Staunen Trauer
	I_LB_8	4b	Ekel, Wut
	I_LB_9	3b	Trauer
	I_LB_10	1b	Trauer

Des Weiteren wird auf Items von laePP Bezug genommen; und nach Faszination, Ästhetik sowie Originalität gefragt. Danach werden Aspekte aus dem Kriterienkatalog zur Auswahl der Bilder genannt, um zu untersuchen, welche der Kriterien die Probanden als relevant wahrnehmen.

Tabelle A.13: Antworten der Probanden zu ästhetischen Merkmalen

Frage	Proband	Bild	Antwort in Stichworten
9. Bei diesen Bildern haben viele SuS gesagt, dass es faszinierend finden. Bei diesem weniger. Findest du das auch dieses hier faszinierender?	I_SF_1	3	Kann mehr erkennen Unterschied Farben, mehr Farben
	I_SF_2	2	Beides ist ein Regenbogen, eins draußen mit Wald oder Gras, beides sind „nur“ Regenbögen, nicht faszinierend, weil etwas Normales
	I_SF_3	2	2a ist schöner 2b ist faszinierender
	I_SF_4	2a	Schön
	I_SF_5	1	Man schaut es lieber an
	I_SF_7	3a	Schöne Farbe, nicht eintönig

	I_SF_8	4a	Ja, weil Mehr Farbe Natur
10. Findest du das auch dieses hier faszinierender?	I_SF_1	3	Kein Unterschied
11. Und wenn ich nach ästhetischer fragen würde, wäre die Antwort auch so?	I_SF_5	1	Eindeutig, welches ästhetischer
	I_SF_6	3a	Schön Farben einfach
	I_SF_7	3a	Gleiche Antwort
	I_SF_8	4a	Gleiche Antwort
12. Und bei ansprechend?	I_SF_3	2	2a Schöner
	I_SF_4	2	2a) sieht man öfter
	I_SF_5	1	Ja, gleiche Antwort
13. Was ist bei dem anderen Bild weniger dementsprechend negativ?	I_SF_5	1b	Düster und langweilig Niemals bei Pinterest Jeder kann Bauklötze hinstellen
	I_SF_6	3b	Keine Farbe
	I_SF_7	3b	Der Buchstabe F ist falschrum- das stört, auch wenn man das Bild umdreht Es ist sehr eintönig
	I_SF_8	4b	Es ist eintönig
14. Originell /Kreativ	I_SF_2	2	2b Farben greller, das ist gut
	I_SF_3	2	Zu Originell: a originell, weil besonders B (<i>etwas nicht gut lesbar: Sacher herstellen?</i>) wichtiges nicht lustig
	I_SF_4	2	2a Kann man originell annehmen, RB sind vergänglich, man muss eine gute Chance haben 2b Dagegen ist nicht originell, den im Zimmer kann man die ganze Zeit anschauen
	I_LB_1	3	Ja mehr als ein Buchstabe gespiegelt
	I_LB_2	2	Ja bunt fällt es besser auf
	I_LB_3	1	Ja viele Details
	I_LB_4	4	Ja Natur
	I_LB_5	2	Nein Natur zeigt es selbst
	I_LB_6	1	Ja schöne Farben der Sonne
	I_LB_7	4	Ja schöne Natur
	I_LB_8	2	Ja Wolken am Boden
	I_LB_9	2	Nein sieht man in der Natur
	I_LB_10	3	Ja bunt, Natur
15. Kommen wir noch einmal zum ersten Bild zurück: Welches	I_SF_1	1a	Farbigkeit Kontrast Symmetrie Anzahl an Elementen wichtigsten

Merkmal ist für dich am wichtigsten:	I_SF_2	1a	Farbigkeit Symmetrie Wichtig Motiv auch wichtig	Kontrast Anzahl an Elementen
	I_SF_3	4a	Farbigkeit Symmetrie Wichtig	Kontrast Anzahl an Elementen ohne Wasser langweilig
	I_SF_4	3a	Farbigkeit Symmetrie Wichtig hier mit dem See	Kontrast Anzahl an Elementen schön
	I_SF_5	3a	Farbigkeit Symmetrie wichtig	Kontrast Anzahl an Elementen
	I_SF_6	1a	Farbigkeit Symmetrie Wichtig	Kontrast Anzahl an Elementen
	I_SF_7	3a	Farbigkeit Symmetrie Wichtig 1 2 wichtig, bei zu wenig ist langweilig	Kontrast Anzahl an Elementen 3 4 es
	I_SF_8	4a	Farbigkeit Symmetrie Wichtig 1 unwichtig 3	Kontrast Anzahl an Elementen manchmal wichtig 2 wichtig 1
	I_LB_1	3a	Farbigkeit	
	I_LB_2	3a	Farbigkeit	
	I_LB_3	4a	Farbigkeit	
	I_LB_4	1a	Symmetrie	
	I_LB_5	3a	Farbigkeit	
	I_LB_6	1a	Symmetrie	
	I_LB_7	3a	Komplexität	
	I_LB_8	4a	Symmetrie, Komplexität	
	I_LB_9	1a	Farbigkeit	
	I_LB_10	2a	Komplexität	

Zuletzt wurde allgemeinen Fragen Raum gelassen. Abschließend wurde mit einer beiläufigen Frage geprüft, ob der Kontext Natur nach dem Umdrehen der Bilder noch präsent ist. Dazu wurde nach Beispielen für Vorkommen von einem der gezeigten Phänomene gefragt.

Tabelle A.14: Sonstige Kommentare der Probanden sowie Aktualisierungsstärke.

Frage	Proband	Bild	Antwort in Stichworten
16. Fällt dir sonst noch was auf? Hast du Fragen?	I_SF_8	4a	Sam unscharf, also entweder ist der Hintergrund unscharf oder die Kugel. Doof
17. Wo tritt das Phänomen Lichtausbreitung (1) bzw. Reflexion (3) auf?	I_SF_1	3	Beamer, Brille
	I_SF_2	1	Weiß ich nicht
	I_SF_3	3	Spiegel
	I_SF_4	1	Bei Lampen
	I_SF_5	1	Schatten, Sonne scheint auf Menschen
	I_SF_6	3	Spiegel, Fenster

Publikationsliste

Lamparter, T., Girwidz, R., (2020) Sehen was unsichtbar ist - Visualisierungen und Experiment im UV-Bereich, Tagungsband der GDGP, 40(2020)

Lamparter, T., Thoms, L.-J., Girwidz, R. (2020). Überprüfe deinen Sonnenschutz! Transmission und Reflexion im UV-Bereich. Naturwissenschaften im Unterricht Physik, 31(175), 41–45

Lamparter, T., Belm, A, Girwidz, R. (2021). Nicht zu warm und nicht zu kalt. Lernen an Stationen zur Thermoregulation von Lebewesen und in der Technik. Naturwissenschaften im Unterricht Physik, 32(185), 27–31.

Lamparter, T. (2021) Unsichtbares sichtbar machen: Wie effektiv waschen wir die Hände? Ein Analogie-Experiment, Naturwissenschaften im Unterricht Physik, 183(184), 97

Zähringer, T., Girwidz, R., Müller, A. Conceptualization and Quantitative study of Aesthetic and Affective Perception of Pictures in Physics Education, arXiv:2411.04779, eingereicht bei: Physical Review Physics Education Research

Danksagung

Zum Gelingen dieser Arbeit haben viele Personen beigetragen, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Raimund Girwidz, der diese Promotion in der Physikdidaktik ermöglichte. Durch ihn haben ich viel in der Physikdidaktik gelernt und darüber hinaus fürs Leben wichtige Softskills. Neben seiner wissenschaftlichen Expertise war vor allem seine menschliche und freundliche Art eine bereichernde Erfahrung. Ich habe seine stets geduldige und inspirative Art sehr geschätzt. Ich danke für das in mich gesetzte Vertrauen sowie für die vielen konstruktiven und gewinnbringenden Diskussionen.

Ein großer Dank gilt auch Prof. Dr. Andreas Müller, der als zweiter Betreuer diese Arbeit maßgeblich mit inhaltlichen Impulsen bereichert hat. Von seiner fachlichen Kompetenz konnte ich viel lernen. Über ihn ging auch der Kontakt zur Wilfried-und-Ingrid-Kuhn-Stiftung für Physikdidaktik, die mich finanziell unterstützt hat. Ein Dank auch an Ingeborg Kuhn, die mich inspirativ bereichert hat, aber diesen Tag leider nicht mehr miterleben kann.

Ich bedanke mich bei Prof Dr. Jochen Kuhn für die freundliche Aufnahme in seine Arbeitsgruppe und die Gelegenheiten, meine Ergebnisse im Arbeitsgruppenkolloquium vorzustellen.

Ein besonderer Dank gilt auch den ehemaligen Mitgliedern der AG Girwidz. Besonders bei Bianca möchte ich mich bedanken für die herzliche Aufnahme in die Gruppe, ihre umfassenden Erklärungen und die Teilhabe an ihrem großen Enthusiasmus für alles. Weiterhin danke ich Matthias für wertvollen Input und anregende Diskussionen. Auch Sabine gilt für die organisatorische Unterstützung hier ein großes Dankeschön.

Ein Dank geht auch an die „neue“ AG Kuhn. Hier möchte ich mich stellvertretend bei Natalia bedanken, einer wundervollen Zimmerpartnerin, mit der ich gemeinsam lachen sowie inspirierende Gespräche führen konnte. Ein großes Dankeschön gilt auch Verena und unserer Schreibwerkstatt. Aish danke ich für Spaß am Arbeitsplatz und für das gemeinsame Fahrradfahren. Der gesamten AG danke ich für die vielen gemeinsamen Mittagessen mit interessanten Gesprächen. Nochmal ein besonderer Dank an Verena, die Teile dieser Arbeit gegengelesen hat.

Mein Dank gilt den vielen Schülerinnen und Schülern, durch deren Teilnahme die Studien überhaupt erst zustande kommen konnten sowie ihren sehr kooperativen Lehrkräften. Hier gilt ein besonderer Dank an Stefan Richtberg, dessen Optik-Unterricht ich beisitzen durfte.

Ein großer Dank gilt auch den Zulassungsstudentinnen und Studenten, die mich jeweils für kurze Zeit begleitet haben: Michael Hertwich und Markus Hauser mit Experimenten zu UV-Strahlung,

Annalena Belm mit Überlegungen zu IR-Fotografien, Jaqueline Müller mit ersten Untersuchungen zur Wahrnehmung von Bildern und schließlich Lisa Buchner, die die Interviewstudie erweitert hat.

Neben Kollegen möchte ich auch meinem Quidditch-Team danken, das nicht nur einen sportlichen Ausgleich gegeben hat, sondern dessen einzelne Mitglieder während der Corona-Epidemie auch zum Coworken bereit waren.

Ein riesengroßes Dankeschön gilt meiner Familie, die mich in jeder Phase meiner Arbeit unterstützt hat. Besonders danke ich meinen Großeltern, die mir nicht nur ihre Faszination für Physik und Ästhetik weitergeben haben, sondern auch stets motivierend, kritisch diskutierend, aber vor allem unterstützend beiseite standen. Genauso danke ich auch meinen Eltern und meiner Schwester, welche mich immer unterstützt haben und stets hinter mir standen.

Und zu guter Letzt: Ein riesiges Dankeschön an Jonas, inzwischen meinem Mann, für die ständige Unterstützung und Motivation in den herausforderndsten Momenten.