

RP

TU Rheinland-Pfälzische
Technische Universität
Kaiserslautern
Landau

**Die Potenziale von Augmented Reality im
Biologieunterricht**

**Entwicklung und Evaluation tablet-basierter
Augmented-Reality-Apps in authentischen
biologischen Unterrichtsszenarien**

vom Fachbereich Biologie
der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau
zur Verleihung des akademischen Grades „Doktor der Naturwissenschaften“ genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Carsten Hoffmann, M. Ed., geboren am 15.07.1990

Wissenschaftliche Aussprache: 24.07.2023

Berichterstattende:

Prof. Dr. Christoph Thyssen (Betreuer)

Prof. Dr. Johannes Huwer

Kaiserslautern im Jahr 2023

D 386

Kurzfassung

Die steigende Verfügbarkeit von Smartphones und Tablet-PCs in der Schule bieten neue methodische und mediale Wege der Unterrichtsgestaltung, die zur Beurteilung der Lernwirksamkeit eine wissenschaftliche Betrachtung erfordern. Während zahlreiche Publikationen zu Augmented Reality (AR) im Bildungskontext existieren, fehlt es an einer differenzierten Betrachtung der Lernwirksamkeit AR-typischer Merkmale sowie breit angelegter Untersuchungsdesigns. Ziel dieser Arbeit ist es, die Lernwirksamkeit von AR in authentischen biologischen Unterrichtsszenarien multiperspektivisch zu betrachten. Zur Beurteilung der Lernwirksamkeit wurden Daten zu Lernzuwachs (LZ), Cognitive Load (CL), Nutzungserlebnis (UX), empfundener Lernunterstützung (ELU) sowie zur Immersion gemessen. Die Forschungsfragen beziehen sich auf den Einfluss der Art des Mediums, der Steuerung, des Triggers und der medialen Repräsentation auf die Lernwirksamkeit.

Die Untersuchungen wurden mithilfe eigens entwickelter AR-Apps mit 769 Teilnehmenden aus rheinland-pfälzischen Gymnasien und zwei Universitäten durchgeführt. Neben dem Nachweis theoretischer Zusammenhänge der untersuchten Parameter mittels Strukturgleichungsmodellierung konnten mehrheitlich signifikante Unterschiede im LZ zugunsten von AR festgestellt werden. Darüber hinaus zeigten die Studien dieser Arbeit einen positiven Einfluss von AR auf den CL, sodass sich der Einsatz von AR nicht nachteilig auf die kognitive Belastung auswirkt. Neben dem überdurchschnittlich bis exzellenten Abschneiden der AR-Apps im Benchmark-Vergleich (Vergleichsgruppe n = 20190 (Schrepp, 2019)), konnten positive Effekte der UX-Dimension Stimulation auf die Reduktion des lernhinderlichen Extraneous Cognitive Loads und die Steigerung des lernförderlichen Germane Cognitive Loads nachgewiesen werden. Hinsichtlich der ELU zeigten sich verschiedene mediale Präferenzen der Teilnehmenden, sodass durch die Verwendung von AR im Sinne eines wechselnden Medieneinsatzes die Bedürfnisse aller Lernenden abgedeckt werden kann. Weiterhin erreichten die Teilnehmenden die höchste der drei Ebenen der Immersion, sodass die Art des Triggers die 21 Immersionsfaktoren von Georgiou und Kyza (2017a) ergänzt.

Die Arbeit leistet auf Grundlage der Identifikation von AR-typischen Merkmalen einen Beitrag zum besseren Verständnis der lernwirksamen Potenziale von AR-basierten Lernumgebungen und zeigt darüber hinaus theoriebildende Implikationen zur Messung des CL auf. Ob sich mithilfe von AR der CL senken lässt, bedarf es Untersuchungen in Lernsettings, die einen hohen CL aufweisen. Weiterhin bietet der ARI-Fragebogen einen geeigneten Ausgangspunkt zur Erforschung AR-typischer Immersionsfaktoren. Trotzdem bedarf es weiterer Studien zur Validierung des ARI-Fragebogens und zur systematischen Untersuchung der Lernwirksamkeit von AR-typischen Merkmalen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Danksagung	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
1 Problemstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Vorgehensweise	4
2 Theoretische Hintergründe	8
2.1 Augmented Reality	8
2.1.1 Trigger	9
2.1.2 Hardware	12
2.1.3 Software	14
2.2 Etablierte Unterrichtsmedien	24
2.3 Cognitive-Load-Theorie	28
2.3.1 Intrinsic Cognitive Load	28
2.3.2 Extraneous Cognitive Load	29
2.3.3 Germane Cognitive Load	30
2.3.4 Verhältnis der Cognitive Loads und Cognitive-Load-Effekte	31
2.4 Benutzungsschnittstellen der Mensch-Computer-Interaktion	33
2.5 Benutzungsfreundlichkeit und Nutzungserlebnis	37
2.6 Immersion	44
2.7 Empfundene Lernunterstützung	47
2.8 Kognitive Leistung	48
2.9 Aktueller Forschungsstand zur Lernwirksamkeit von Augmented Reality	50
3 Allgemeine und biomedizinische Grundlagen zur Planung der Lehr-Lern-Umgebungen	53
3.1 Der Aufbau des menschlichen Gehirns und die Pathologie der Alzheimer-Demenz	53
3.1.1 Fachliche Charakterisierung der Unterrichtsinhalte	54
3.1.2 Lernziele und Kompetenzen	60

3.1.3	Fachdidaktische Begründung der Stoffauswahl	61
3.1.4	Methodische Überlegungen	65
3.1.5	Voraussetzungen für die unterrichtliche Umsetzung	66
3.1.6	Ablauf der Lehreinheit	67
3.1.7	Vergleich der Lernsettings: Augmented Reality vs. etablierte Unterrichtsmedien	68
3.2	Der Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten.....	69
3.2.1	Fachliche Charakterisierung der Unterrichtsinhalte	69
3.2.2	Lernziele und Kompetenzen	74
3.2.3	Fachdidaktische Begründung der Stoffauswahl	74
3.2.4	Methodische Überlegungen	76
3.2.5	Voraussetzungen zur unterrichtlichen Umsetzung	78
3.2.6	Ablauf der Lehreinheit	78
3.2.7	Vergleich der Steuerungsmodi: Augmented Reality vs. Gestensteuerung	79
4	Hypothesen _____	80
4.1	Studie: Alzheimerkoffer	81
4.2	Studie: Mitochondrien und Chloroplasten	82
4.3	Detailstudie: HoloBrain	83
5	Material und Methoden _____	84
5.1	Entwicklung des Grundkonzepts für Augmented-Reality-Apps	84
5.2	Design und Funktionalität der Lernumgebungen	88
5.3	Technische Voraussetzungen	95
5.4	Vorstudien	96
5.4.1	Alzheimerkoffer	97
5.4.2	Mitochondrien und Chloroplasten	100
5.4.3	HoloBrain	101
5.5	Stichprobe	101
5.6	Akquise von Studienteilnehmenden und datenschutzrechtliche Aspekte	104
5.7	Organisatorischer Rahmen der Tests und Befragungen	105
5.8	Beschreibung der Lernsettings	106
5.9	Testinstrumente.....	112
5.9.1	Statistische Datenauswertung	112
5.9.2	Cognitive-Load-Theory	113
5.9.3	User-Experience-Questionnaire	121
5.9.4	Empfundene Lernunterstützung	126

5.9.5	Augmented-Reality-Immersion-Fragebogen	130
5.9.6	Kognitive Leistungstests	132
6	Ergebnisse	138
6.1	Vorwissen, Lernerfolg und Lernzuwachs	138
6.1.1	Art des Mediums (Forschungsfrage 2): Aufbau des Gehirns und Alzheimer-Demenz	138
6.1.2	Art der Steuerung (Forschungsfrage 3): Mitochondrien und Chloroplasten	141
6.1.3	Art des Triggers (Forschungsfrage 4): HoloBrain	142
6.2	Cognitive Load	145
6.2.1	Art des Mediums (Forschungsfragen 1 und 2): Aufbau des Gehirns und Alzheimer-Demenz	145
6.2.2	Art der Steuerung (Forschungsfragen 1 und 3): Mitochondrien und Chloroplasten	148
6.2.3	Art des Triggers (Forschungsfrage 4): HoloBrain	151
6.2.4	Art der medialen Repräsentation (Forschungsfrage 5): HoloBrain	152
6.3	Nutzungserlebnis	154
6.3.1	Art des Mediums (Forschungsfragen 1 und 2): Aufbau des Gehirns und Alzheimer-Demenz	154
6.3.2	Art der Steuerung (Forschungsfrage 1 und 3): Mitochondrien und Chloroplasten	157
6.3.3	Art des Triggers (Forschungsfrage 4): HoloBrain	162
6.3.4	Art der medialen Repräsentation (Forschungsfrage 5): HoloBrain	163
6.4	Empfundene Lernunterstützung	165
6.4.1	Art des Mediums (FF1, FF2): Aufbau des Gehirns und Alzheimer-Demenz	165
6.4.2	Art der Steuerung (Forschungsfrage 3): Mitochondrien und Chloroplasten	168
6.5	Immersion	171
6.5.1	Art des Triggers (Forschungsfrage 4): HoloBrain	171
6.5.2	Art der medialen Repräsentation (Forschungsfrage 5): HoloBrain	172
6.6	Ergebniszusammenführung	174
7	Diskussion	178
7.1	Lernzuwachs	178
7.1.1	Art des Mediums (Forschungsfrage 2): Aufbau des Gehirns und Pathologie der Alzheimer-Demenz	179
7.1.2	Art der Steuerung (Forschungsfrage 3): Mitochondrien und Chloroplasten	179
7.1.3	Art des Triggers (Forschungsfrage 4): HoloBrain	181
7.2	Cognitive Load	181
7.2.1	Zusammenhangsanalysen (Forschungsfrage 1): Cognitive-Load-Theory und Lernzuwachs	182

7.2.2	Art des Mediums (Forschungsfrage 2): Aufbau des Gehirns und Pathologie der Alzheimer-Demenz	184
7.2.3	Art der Steuerung (Forschungsfrage 3): Mitochondrien und Chloroplasten	189
7.2.4	Art des Triggers und der medialen Repräsentation (Forschungsfragen 4 und 5): HoloBrain	190
7.3	Nutzungserlebnis.....	192
7.3.1	Zusammenhangsanalysen (Forschungsfrage 1): Cognitive-Load-Theory und Nutzungserlebnis	192
7.3.2	Einfluss des Nutzungserlebnisses auf den Cognitive Load (Forschungsfrage 1): Aufbau des Gehirns und Pathologie der Alzheimer-Demenz	193
7.3.3	Art der Steuerung (Forschungsfrage 3): Mitochondrien und Chloroplasten	195
7.3.4	Art des Triggers und mediale Repräsentation (Forschungsfragen 4 und 5): HoloBrain	197
7.4	Empfundene Lernunterstützung.....	199
7.4.1	Zusammenhangsanalyse: Empfundene Lernunterstützung und Cognitive-Load-Theory	199
7.4.2	Art des Mediums (Forschungsfrage 2): Aufbau des Gehirns und Pathologie der Alzheimer-Demenz	200
7.4.3	Art des Mediums (Forschungsfrage 2): Mitochondrien und Chloroplasten	201
7.5	Immersion	202
7.5.1	Art des Triggers und medialer Repräsentation (Forschungsfragen 4 und 5): HoloBrain	203
8	Fazit _____	205
9	Ausblick _____	215
10	Literaturverzeichnis _____	219
11	Lebenslauf _____	239
12	Eidesstattliche Erklärung _____	241
13	Anhang _____	242

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich von ganzem Herzen bei Allen bedanken, die mich während meiner Promotion unterstützt und begleitet haben. Ohne diese Hilfe und Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Ich möchte meinem Doktorvater, Prof. Dr. Christoph Thyssen, meinen aufrichtigen Dank aussprechen. Er gab mir die Chance, mich diesem interessanten Thema in seiner Arbeitsgruppe zu widmen. Dabei stand er mir stets mit bereichernden und inspirierenden Diskussionen zur Seite. Seine wertvollen Ratschläge und die fortwährende Unterstützung, haben mir geholfen diese Forschungsarbeit voranzutreiben.

Auch bei Prof. Dr. Johannes Huwer von der Universität Konstanz bedanke ich mich herzlich für die universitätsübergreifende und freundliche Übernahme des Koreferats.

Prof. Dr. Stefan Kins danke ich für die Bereitschaft, den Vorsitz der Promotionskommission zu übernehmen und für die Möglichkeit, an der Weiterentwicklung des Alzheimerkoffers mitzuwirken.

Ein weiterer Dank geht an die Klaus Tschira Stiftung und die Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) für die finanzielle Förderung. Ebenso möchte ich mich bei Alexander Würkner (RPTU) für die Bereitstellung von 3D-Daten und bei Julia Germann von der pro Campus GmbH für die Hilfe bei der Veröffentlichung der Alzheimer AR App bedanken. Hervorheben möchte ich außerdem die Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Steffen Schaal von der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg, welcher zur Untersuchung der Immersion in AR-Lernumgebungen weitere Impulse für diese Arbeit setzte.

Auch meinen Kolleg:innen Eva, Kristine, Renate, Anja, Aline, Arash, Maik und Alexandra danke ich für die gemeinsame Zeit, die moralische Unterstützung und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Ein besonderer Dank gebührt auch Lars, der mich vor, während und nach meiner Elternzeit unterstützt hat, sowie allen engagierten Lehrkräften und Schüler:innen, die ich im Rahmen der Erhebungen kennenlernen durfte.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Frau Sabrina bedanken, die mich unbeirrt und bedingungslos unterstützt hat und ohne deren Rückhalt diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Danke.

Abkürzungsverzeichnis

AIC	Akaike Informationskriterium
AICD	Amyloid-Precursor-Protein Intracellular Domain
APP	Amyloid-Precursor-Protein
AR	Augmented Reality
AV	Augmented Virtuality
A β	Amyloid- β -Protein
BYOD	Bring-your-own-Device
CL	Cognitive Load
CLI	Command-Line-Interface
CLT	Cognitive-Load-Theory
ECL	Extraneous Cognitive Load
ELU	empfundene Lernunterstützung
<i>ER</i>	Extraneous Resources
EUM	etablierte Unterrichtsmedien
FBX	Filmbox
FF	Forschungsfrage
GCL	Germane Cognitive Load
GIQ	Gamer-Immersion-Questionnaire
<i>GR</i>	Germane Resources
GUI	Graphical User-Interface
HMD	Head-mounted Devices
ICL	Intrinsic Cognitive Load
IDE	Insulin-degrading Enzyme
LS	Lernsetting
LZ	Lernzuwachs
MDM	Mobile-Device-Management
<i>NEP</i>	Neprilysin
NFT	neurofibrillary tangles
NUI	Natural User-Interface
RE	Real Environment
RGB	8-Bit-Rot-Grün-Blau
SDK	Software-Development-Kit
SLAM	Simultaneous-Localization-and-Mapping
TAM	Technology-Acceptance-Model
TUI	Tangible User-Interface
UEQ	User-Experience-Questionnaire
UI	Benutzungsschnittstelle (engl. User Interface)
UX	User Experience
VE	Virtual Environment
VR	Virtual Reality

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Virtuality-Kontinuum.....	8
Abb. 2: Merkmale von Augmented Reality.....	9
Abb. 3: Realobjekte und Darstellungsformen nach Abstraktionsgrad	27
Abb. 4: Beispiele für Tangible User-Interfaces.	35
Abb. 5: Normen der Benutzerfreundlichkeit und der User-Experience	39
Abb. 6: Hauptschnittebenen des menschlichen Körpers.....	57
Abb. 7: Proteolytische Prozessierung des Amyloid-Precursor-Proteins.....	59
Abb. 8: Vergleich von Mitochondrium und Chloroplast.....	71
Abb. 9: Der Aufbau und die Energiegewinnung eines Mitochondriums	71
Abb. 10: Übersicht über die Photosynthese: Licht- und Dunkelreaktion	73
Abb. 11: Ablauf der Photosynthese an der Thylakoidmembran	73
Abb. 12: Hauptmenüs der Apps	90
Abb. 13: Exemplarische Darstellung einer Augmented-Reality-Szene	90
Abb. 14: Augmented-Reality-Szene Aufgabe 2.	91
Abb. 15: Bildschirmfotos der Mitochondrien & Chloroplasten App.....	93
Abb. 16: Darstellungen der <i>HoloBrain-App</i>	95
Abb. 17: Einsatzerfahrungen von Augmented Reality vor Studienbeginn.....	103
Abb. 18: Erhebungsstruktur der einzelnen Studien.	105
Abb. 19: Cognitive Load: Pfaddiagramm der konfirmatorischen Faktorenanalyse	119
Abb. 20: Cognitive Load: Pfaddiagramm der konfirmatorischen Faktorenanalyse	120
Abb. 21: Struktur des User-Experience-Questionnaire.....	122
Abb. 22: Itembeispiel des User-Experience-Questionnaire.....	123
Abb. 23: User-Experience-Questionnaire: Pfaddiagramm der konfirmatorischen Faktorenanalyse	124
Abb. 24: Empfundene Lernunterstützung: Pfaddiagramm der konfirmatorischen Faktorenanalyse	129
Abb. 25: Beispielaufgabe des Pre-/Post-Tests der HoloBrain-Studie in OLAT	137
Abb. 26: Relativer Lernzuwachs nach Medium (Aufbau des Gehirns und Alzheimer- Demenz)	140
Abb. 27: Relativer Lernzuwachs nach Steuerung (AR- und Touch-Gestensteuerung).....	142
Abb. 28: Relativer Lernzuwachs nach Art des Triggers (3D-QR-Cube oder 2D- Gehirnscheibe)	144
Abb. 29: Cognitive Loads nach Medium (AR & EUM)	146
Abb. 30: Strukturgleichungsmodell (CLT und LZ).....	147
Abb. 31: Cognitive Loads nach Steuerungsart (AR und Gestensteuerung).....	149
Abb. 32: Cognitive Load nach Art des Triggers (3D-QR-Cube und 2D-Gehirnscheibe).....	152

Abb. 33: Cognitive Load nach medialer Repräsentation (AR-Hirnmodell und Papiermodell).....	153
Abb. 34: Ergebnisse des Benchmark-Vergleichs (Gehirn-AR-App)	155
Abb. 35: Strukturgleichungsmodell (CLT und UEQ)	156
Abb. 36: Ergebnisse des Benchmark-Vergleichs (Mitochondrien und Chloroplasten).....	158
Abb. 37: Nutzungserlebnis-Dimensionen nach Steuerungsart.....	159
Abb. 38: User-Experience-Dimensionen nach Lernsetting.....	160
Abb. 39: Ergebnisse des Benchmark-Vergleichs (HoloBrain-App)	162
Abb. 40: User-Experience-Dimensionen nach Art des Triggers.....	163
Abb. 41: User-Experience-Dimensionen nach medialer Repräsentation	164
Abb. 42: Empfundene Lernunterstützung nach Medium (AR und EUM).....	166
Abb. 43: Strukturgleichungsmodell (CLT und ELU).....	167
Abb. 44: Empfundene Lernunterstützung nach Steuerungsart	169
Abb. 45: Dimensionen der Immersion nach Art des Triggers.....	172
Abb. 46: Immersion nach medialer Repräsentation.....	173

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Cognitive-Load-Effekte.....	31
Tab. 2: Anatomische Lage- und Richtungsbegriffe.....	56
Tab. 3: Ausgewählte Lehrplaninhalte.....	62
Tab. 4: Verlaufsplan der Unterrichtseinheiten.....	67
Tab. 5: Verlaufsplan der Unterrichtseinheit.....	78
Tab. 6: Übersichtsdarstellung der einzelnen Studien.	81
Tab. 7: Anzahl der Studienteilnehmenden für einzelne Unterrichtseinheiten.....	102
Tab. 8: Letzte Zeugnisnote im Fach Biologie.....	103
Tab. 9: Beschreibung einzelner Lernsettings (LS).....	107
Tab. 10: Beschreibung einzelner Lernsettings (LS).....	110
Tab. 11: Beschreibung einzelner Lernsettings (LS).....	111
Tab. 12: Cognitive Load: Frageitems zur Erfassung des Cognitive Load	115
Tab. 13: Formulierungsanpassungen der Testitems	116
Tab. 14: Cognitive Load: Faktorladungen und interne Konsistenz.....	117
Tab. 15: Cognitive Load: Korrelationen zwischen den Faktoren.	117
Tab. 16: Cognitive Load: Mittelwerte.....	118
Tab. 17: Benchmark-Vergleichs-Grenzen des User-Experience-Questionnaire.....	122
Tab. 18: Frageitems des User-Experience-Questionnaire	123
Tab. 19: Empfundene Lernunterstützung: Frageitems	126
Tab. 20: Empfundene Lernunterstützung: Faktorladungen	127
Tab. 21: Empfundene Lernunterstützung: Korrelationen zwischen den Faktoren.	127
Tab. 22: Empfundene Lernunterstützung: Mittelwerte.....	128
Tab. 23: Deutsche Übersetzung des Augmented-Reality-Immersion-Fragebogens.....	131
Tab. 24: Alzheimerkoffer: Punkteverteilung je Aufgabe und Summe.	134
Tab. 25: Anzahl korrekter Antworten.....	135
Tab. 26: Mittelwertvergleiche des Vorwissens (Aufbau des Gehirns und Alzheimer- Demenz)	139
Tab. 27: Mittelwertvergleiche des Vorwissens (Mitochondrien und Chloroplasten).....	141
Tab. 28: Pfadkoeffizienten und Kovarianz der Strukturgleichungsmodellierung (CLT und LZ).....	148
Tab. 29: Ergebnisse der multiplen linearen Regression (CLT).....	150
Tab. 30: Pfadkoeffizienten und Kovarianz der Strukturgleichungsmodellierung	156
Tab. 31: Pfadkoeffizienten und Kovarianz der Strukturgleichungsmodellierung	167
Tab. 32: Korrelationsmatrix ELU AR mit ECL und GCL.	170
Tab. 33: Ergebnisübersicht der einzelnen Studien.	174

1 Problemstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise

1.1 Einleitung

I'm excited about augmented reality because unlike virtual reality, which closes the world out, AR allows individuals to be present in the world but hopefully allows an improvement on what's happening presently. – Tim Cook (2017)

Diese Vision des Apple CEOs beschreibt nicht nur den grundlegenden Unterschied zwischen Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR), sondern zeigt auch ein großes Potenzial von AR im Bildungskontext auf: präsent sein in der Realität. Anders als bei VR, in der die Nutzenden in eine rein virtuelle Welt eintauchen, ermöglicht es AR, die Realität mithilfe von unterschiedlicher Hardware durch virtuelle Komponenten interaktiv und in Echtzeit zu erweitern (Azuma, 1997).

Im Zuge der Verbesserung der digitalen Infrastruktur an Schulen durch den landesübergreifenden *DigitalPakt Schule* wird die technische Grundlage geschaffen, die den breiten Einsatz von AR im Unterricht ermöglicht. In Bezug auf die notwendige Hardware nimmt nach einer Umfrage des Verband Bildung und Erziehung e.V. und forsa Politik- und Sozialforschung GmbH (2021, S. 26) zur Digitalisierung an Schulen die Verfügbarkeit von Tablets für Schüler:innen deutschlandweit rapide zu: Im Jahr 2021 gaben die Schulen an, dass 7 % aller Klassen über Tablets verfügen würden, 71 % hätten Tablets, jedoch nicht für alle Klassen, und 22 % der Schulen würden über keine Tablets verfügen. Gerade letzterer Wert sank zum Vorjahr – von ehemals 63 % – um 41 Prozentpunkte. Damit wird deutlich, dass die Schulen größtenteils über die notwendige Hardware verfügen und einem potenziellen Einsatz von AR im Unterricht nichts im Wege steht. Ebendiese Hardwareverfügbarkeit stellt damit im Vergleich zur VR eine niedrige Einstiegshürde dar. Die AR bietet darüber hinaus den Vorteil, dass sie nicht nur für die Augen und Ohren der jeweils Nutzenden zugänglich ist, sondern dass damit Räume zum Austausch, zur Interaktion und letztlich zum sozialen Lernen geschaffen werden. Die Nutzenden grenzen sich nicht von der Außenwelt ab, sondern bleiben weiterhin für die Lehrkraft ansprechbar und präsent.

Im Sinne Klafkis bildungstheoretischer Didaktik ist die „Ermöglichung produktiver Lernprozesse“ (Gudjons & Traub, 2020, S. 244) die Hauptaufgabe von Lehrkräften. Zu ebendieser Ermöglichung gehört neben der Auswahl relevanter Bildungsinhalte die didaktische Transformation wie auch die Wahl der passenden Methode (und damit auch die Wahl des passenden Mediums). Neben dem breiten Kanon an klassischen, analogen Unterrichtsmedien finden im Zuge der Digitalisierung immer mehr neue Medien Einzug in den Unterricht. Wie auch zur Auswahl und Transformation bildungsrelevanter Inhalte ein breites

Fachwissen benötigt wird, bedarf es umfassender Kenntnisse über die Eignung unterschiedlicher Medien, um die Inhalte zu vermitteln. Während diese mediendidaktische Kompetenz im Bereich der etablierten Unterrichtsmedien (EUM), sei es durch die eigene schulische Vita, durch die Stufen der Lehrerbildungskette oder durch die langjährige Praxis im Schulalltag, ausgebildet und vollzogen wird, treten allein durch die Fülle und Komplexität bei der Auswahl digitaler Unterrichtsmedien neue Herausforderungen auf. Um den Einsatz neuer Medien im Unterricht zu legitimieren, stellt sich daher häufig die Frage nach deren Lernwirksamkeit (siehe Forschungsfrage (FF) 2).

Die zahlreichen Metastudien zu AR in Bildungskontexten zeigen seit 2014 einen deutlichen Anstieg der eingereichten Publikationen (Masneri et al., 2022). Die Förderung des Lernzuwachs (LZ) gehört zu den am häufigsten genannten Vorteilen, wohingegen Fragen der Benutzerfreundlichkeit und technische Probleme zu den größten Herausforderungen gehören (Akçayır & Akçayır, 2017). Bacca et al. (2014) fanden darüber hinaus, dass die häufigsten Kontexte, in denen AR in der Bildung eingesetzt wird, Naturwissenschaften und Mathematik umfassen, und die Vorteile meist den LZ und die gesteigerte Motivation betreffen. Garzón und Acevedo (2019) heben ergänzend in ihrer Metastudie hervor, dass sich der größte Teil der korrespondierenden Publikationen mit qualitativen Variablen und Observationen befasst. Die Metastudien zeigen aber auch, dass sich ein Großteil der Forschungsergebnisse auf die universitäre Lehre bezieht (Bacca et al., 2014) und Ergebnisse innerhalb biologischer Kontexte kaum vertreten sind. Ebenso beziehen sich viele Studien nur auf einzelne Lernsettings (LS) (bspw. Altmeyer et al., 2020; Cabero-Almenara et al., 2019; Cai et al., 2013; Chiang et al., 2014; M. B. Ibáñez et al., 2020; Juan et al., 2016; Küçük et al., 2016; Thees et al., 2020; Turan et al., 2018). Dementsprechend wird in dieser Arbeit der Fokus auf die Erfassung der Lernwirksamkeit von AR (und EUM) in unterschiedlichen biologischen LS gelegt. Um möglichst authentische und aussagekräftige Ergebnisse hinsichtlich des schulischen Einsatzes zu erzielen, werden zehn Lehr-Lern-Szenarien der beiden Hauptstudien mit Schüler:innen aus zwanzig rheinland-pfälzischen Gymnasien und Gesamtschulen durchgeführt. Da es für die Lernwirksamkeit keine allgemeingültige Definition gibt und dennoch ein möglichst umfassendes Bild gegeben werden soll, wird die Lernwirksamkeit in den zwei vorliegenden Hauptstudien und einer Detailstudie anhand verschiedener Parameter charakterisiert: des relativen LZ, des Cognitive Load (CL), des Nutzungserlebnisses (engl. User Experience, UX), der empfundenen Lernunterstützung (ELU) und – im Fall der Detailstudie *HoloBrain* – der Immersion. Aufgrund dieser multidimensionalen Betrachtung ergibt sich nicht nur ein umfassenderes Bild über die Lernwirksamkeit und die Potenziale von AR, sondern sie ermöglicht es auch, die theoretischen Zusammenhänge, etwa durch Strukturgleichungsmodellierungen, zwischen den Variablen dieser einzelnen Testinstrumente zu untersuchen (siehe FF1).

Die eingangs von Azuma (1997) zitierte Definition von AR zeichnet sich einerseits durch ihre Allgemeingültigkeit aus, andererseits ist sie zum Vergleich verschiedener AR-Studien zu breit angelegt. Die oben beschriebenen Studien unterscheiden sich nicht nur in den Stichprobencharakteristika, den Testinstrumenten und den Fachdomänen, sondern auch in der technischen Umsetzung der AR-Lernumgebung. Dementsprechend können sich AR-Lernumgebungen grundlegend durch die Auswahl der *Hardware* (Head-Mounted Device, Handheld Device), der *Software inkl. virtueller Komponenten* (bereits vorhandene oder eigens entwickelte Lösungen) und der eingesetzten *Trigger* (Marker-based oder Marker-less AR) unterscheiden. Durch die Kombination dieser Bestandteile entsteht ein breites Feld an technischen Möglichkeiten, die ihrerseits die tatsächliche AR-Lernumgebung beeinflussen und sich wiederum in unterschiedlichem Maße auf die Nutzenden auswirken.

Eine Marker-based-AR-Umsetzung führt bspw. dazu, dass die Software einen Trigger oder Marker erkennt und diesen als Referenz für die Projektion der virtuellen Information nutzt. Hieraus ergeben sich zwei spezifische Merkmale: Einerseits ermöglicht der Einsatz eines Triggers eine zusätzliche Steuerungskomponente, sodass bspw. virtuelle 3D-Objekte mithilfe von Manipulationen in der Realität (Bewegung und Rotation des Triggers) gesteuert werden können, andererseits kann bereits die Auswahl des Triggers Auswirkungen haben – z. B. hinsichtlich einer kausalen Verschränkung zwischen Realität und Virtualität oder Haptik. Während Forschende bisher in ihren Ausführungen zumeist die eingesetzte AR-Umgebung phänomenologisch beschreiben, fehlt es derzeit an Studien, die sich systematisch mit den einzelnen Eigenschaften von AR befassen (siehe FF3 bis FF5).

Auf Grundlage der vorangegangenen Ausführungen theoretischer Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern zur multiperspektivischen Betrachtung der Lernwirksamkeit in AR-basierten Lernszenarien sowie der systematischen Beschreibung verschiedener AR-Merkmale werden in dieser Arbeit folgende Fragestellungen adressiert:

Welche theoretischen Zusammenhänge zwischen den Variablen der unterschiedlichen Testinstrumente lassen sich bestätigen (FF1)?

Welchen Einfluss hat die Art des Mediums (AR oder EUM) auf die Lernwirksamkeit (FF2)?

Welchen Einfluss hat die Art der Steuerung (AR- oder Touch-Gestensteuerung) auf die Lernwirksamkeit (FF3)?

Welchen Einfluss hat die Art des Triggers (3D-Trigger oder 2D-Trigger) auf die Lernwirksamkeit (FF4)?

Welchen Einfluss hat die mediale Repräsentation (virtuelles oder analoges Modell) auf die Lernwirksamkeit (FF5)?

1.2 Vorgehensweise

Die zuvor skizzierten Hintergründe und Fragestellungen werden in dieser Arbeit aufgegriffen, um die Potenziale von AR-basierten Lernumgebungen im Biologieunterricht aufzuzeigen. Im Folgenden werden diese Zielsetzungen in die Gesamtstruktur der Arbeit eingebettet.

Theoretische Hintergründe und empirische Grundlagen (Kapitel 2)

Als fachdidaktischer Forschungsgegenstand steht AR im Fokus der vorliegenden Arbeit (vgl. Kapitel 2.1). Hierzu werden zunächst typische AR-Merkmale skizziert und überblicksartig dargestellt, um diese anschließend auszdifferenzieren (vgl. Kapitel 2.1.1 bis 2.1.3). Dies ermöglicht es einerseits, die Komplexität des Mediums aufzuzeigen, andererseits wird es dadurch erleichtert, technische und mediendidaktische Entscheidungen zur Beantwortung der spezifischen Fragestellungen nachzuvollziehen. In Kapitel 2.2 werden unterschiedliche Medienbegriffe und Medienklassifikationen diskutiert. Ziel ist es dabei, eine Übersicht und fachdidaktische Charakterisierung unterschiedlicher Unterrichtsmedien zu geben und den Begriff der *etablierten Unterrichtsmedien* im Kontext dieser Arbeit zu definieren. Darüber hinaus wird die von Spörhase-Eichmann (2015, S. 158) vorgenommene Medienklassifikation nach Abstraktionsgrad um AR, als Medium mit kombinierter Darstellungsform, erweitert (Abb. 3, S. 27).

Da es sich bei AR zwangsläufig um eine computergestützte Technologie handelt, mit der die Nutzenden konfrontiert werden, widmet sich Kapitel 2.4 den Benutzungsschnittstellen der Mensch-Computer-Interaktion. Weil die Benutzungsschnittstelle (engl. User Interface, UI) stets zwischen der Technologie und den Nutzenden steht und dadurch die Nutzung erst ermöglicht, geht es in diesem Kapitel um die verschiedenen Arten von UI, eine mögliche Einordnung von AR in verschiedene UI und die für die Entwicklung von AR-Apps relevanten Gestaltungsprinzipien. Als zentrales psychologisches Framework zur Charakterisierung der Lernwirksamkeit von AR-basierten Lernumgebungen wird die Cognitive-Load-Theory (CLT) herangezogen (vgl. Kapitel 2.3). Bei dieser wird zwischen verschiedenen kognitiven Belastungen beim Lernen unterschieden (vgl. Kapitel 2.3.1–2.3.3) und sie liefert für bereits aufgeklärte Cognitive-Load-Effekte (vgl. Kapitel 2.3.4) Ansatzpunkte zur Reduktion der kognitiven Belastung.

Im Rahmen AR-basierter Lernumgebungen ist der sog. Split-Attention-Effekt von besonderer Bedeutung. Neben der CLT kann das Nutzungserlebnis (vgl. Kapitel 2.4) einen weiteren Faktor zur Beurteilung der Lernwirksamkeit (digitaler) Medien darstellen. Ausgehend von einer Begriffsabgrenzung zur Benutzerfreundlichkeit werden die verschiedenen Dimensionen des Nutzungserlebnisses erläutert und in einen lerntheoretischen Zusammenhang mit der CLT gebracht. Da gerade in Kontext von VR und AR die Immersion ein verbreitetes Konzept

darstellt und ein noch junges, vielversprechendes Feld der Lernforschung ist, werden in Kapitel 2.6 verschiedene Ansichten der Immersion gegenübergestellt sowie von verwandten Konzepten (bspw. dem Flow) abgegrenzt und es wird ein Überblick über den Stand der Immersionsforschung in Bezug auf Lernen gegeben. Nach einer definitorischen Klärung der *empfundenen Lernunterstützung* (ELU) und dem Aufzeigen von Parallelen zum Technology Acceptance Model (TAM) nach Davis et al. (1989) werden in Kapitel 2.7 Zusammenhänge zur CLT hergestellt. Als letzter (erfassbarer) Forschungsgegenstand dieser Arbeit steht das kognitive Lernen selbst. Hierzu werden in Kapitel 2.8 die für die in der Thesis relevanten Begriffe *Vorwissen*, *Lernen*, *Lernerfolg* und *Lernzuwachs* erläutert und erste Grundlagen zum Verständnis der methodischen Vorgehensweise der Erhebungen (vgl. Kapitel 5.7) werden gelegt. Schließlich wird auf Basis der vorangegangenen Kapitel (vgl. Kapitel 2.3 bis 2.8) der aktuelle Forschungsstand zur Lernwirksamkeit und zu Herausforderungen von AR dargelegt.

Didaktische Grundlagen zur Planung der Lehr-Lern-Umgebungen (Kapitel 3)

Ein Herausstellungsmerkmal dieser Arbeit ist die Erforschung der Lernwirksamkeit von AR in authentischen (biologischen) Unterrichtsszenarien. Dabei gilt es, neben der unterrichtlichen Planung, die Implikationen der empirischen Untersuchung im Blick zu behalten. Die Vorgehensweise der didaktischen Planung der beiden Hauptstudien (Aufbau des menschlichen Gehirns/Pathologie der Alzheimer-Demenz sowie Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten) ist analog. Dementsprechend erfolgt zunächst eine fachwissenschaftliche Betrachtung der zentralen Unterrichtsinhalte (vgl. Kapitel 3.1.1 und 3.2.1), bevor daraus wesentliche Lernziele und Kompetenzen für den Unterricht (vgl. Kapitel 3.1.2 und 3.2.2) abgeleitet werden. Die Unterrichtsinhalte werden durch die curricularen Vorgaben begründet und die fachwissenschaftlichen Inhalte werden durch die *Didaktische Analyse* nach Klafki (1964) anhand der fünf Grundfragen didaktisch transformiert (vgl. Kapitel 3.1.3 und 3.2.3).

Die nachfolgenden methodischen Überlegungen befinden sich im Spannungsfeld zwischen der empirischen Studiendurchführung und realitätsnahem Unterricht. Aufgrund des empirischen Fokus auf die eingesetzten Medien erfolgt in den Kapiteln 3.1.4 und 3.2.4 vorrangig die methodische (unterrichtliche) Planung. Die mediale Analyse der einzelnen LS wird in Kapitel 5.8 ausgelagert. Zur konkreten unterrichtlichen Umsetzung müssen zwischen den Klassen und Kursen gleiche Rahmenbedingungen hinsichtlich Zeit und räumlicher Ausstattung herrschen (vgl. Kapitel 3.1.5 und 3.2.5). Für eine schnelle Nachvollziehbarkeit der Unterrichtseinheiten finden sich in den Kapiteln 3.1.6 und 3.2.6 jeweils tabellarische Verlaufspläne. Da es sich bei der Detailstudie *HoloBrain* um eine universitäre Erhebung handelt und diese in keinem unterrichtlichen Kontext steht, wird von einer didaktischen Planung abgesehen.

Ziele und Design der Studien (Kapitel 4 und 5)

Ausgehend von den theoretischen Hintergründen dieser Arbeit (vgl. Kapitel 2) werden in Kapitel 4 Forschungsfragen und Hypothesen abgeleitet. Aufgrund der multidimensionalen Betrachtung der Lernwirksamkeit durch unterschiedliche psychologische Konzepte (CLT, UX, ELU, Immersion) sowie der Messung des LZ umfasst die FF1 die Überprüfung theoretisch begründeter Zusammenhänge zwischen diesen Variablen. Die FF, die in den Folgekapiteln 4.1 bis 4.3 dargelegt werden, stellen den Einfluss des Mediums (FF2), der Steuerungsart (FF3), der Triggerart (FF4) und der medialen Repräsentation (FF5) auf die Lernwirksamkeit in den Mittelpunkt. Sie ermöglichen so eine differenzierte Betrachtung anhand AR-typischer Merkmale.

Auf Grundlage der theoretischen Vorüberlegungen werden den jeweiligen FF Hypothesen zugeordnet. Um einen Zugang zu den Untersuchungsgegenständen zu erlangen, wird in Kapitel 5 die methodische Vorgehensweise detailliert erläutert. Dazu gehören studienrelevante Faktoren, die zur Konzeption und Programmierung der eingesetzten AR-Apps berücksichtigt werden müssen (vgl. Kapitel 5.1), wie auch die daraus abgeleitete konkrete Beschreibung der technischen Umsetzung der jeweiligen AR-App (vgl. Kapitel 5.2). Darüber hinaus werden die Hardware-spezifischen Voraussetzungen zur Nutzung der AR-Apps und die zur Erhebung notwendige technische Umsetzung beschrieben (vgl. Kapitel 5.3). Die entwickelten AR-basierten Lernumgebungen wurden in Vorstudien erprobt und aus den gewonnenen Erkenntnissen werden methodisch-organisatorische, technische und messinstrumentelle Anpassungen für die Hauptstudien abgeleitet (vgl. Kapitel 5.4).

Neben einer demographischen Beschreibung wird in Kapitel 5.5 die Stichprobe mittels weiterer Parameter (z. B. Vorerfahrungen mit AR, Schulform, Kursform) beschrieben und zur Studiendurchführung notwendige organisatorische Maßnahmen (vgl. Kapitel 5.6) werden erläutert. Der konkrete Ablauf der einzelnen Studien wird aus der Erhebungsstruktur (vgl. Kapitel 5.7, Abb. 18, S. 105) ersichtlich, sodass die in Kapitel 5.8 beschriebenen LS (AR und Kontrolle) inhaltlich und chronologisch nachvollzogen werden können. Auf Grundlage der in den Kapiteln 2.3 bis 2.8 beschriebenen theoretischen Grundlagen werden, nach einer Beschreibung des allgemeinen Vorgehens zur Datenaufbereitung und -auswertung (vgl. Kapitel 5.9.1), die Instrumente der Datengewinnung vorgestellt (vgl. Kapitel 5.9.2 bis 5.9.6). Es wird auf die theoretische und praktische Fundiertheit der jeweiligen Item-basierten Fragebögen, die Übersetzung ins Deutsche und die Anpassungen der Item-Formulierung an die Studien eingegangen. Zur Bestimmung der Skalenqualität sowie zur Berücksichtigung der Testgütekriterien werden die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalysen und der konfirmatorischen Faktorenanalysen bzw. der Reliabilitätsanalyse basierend auf den in den Hauptstudien gewonnenen Daten dargelegt.

Ergebnisse (Kapitel 6)

Aufgrund der umfänglichen multidimensionalen Betrachtung zur Erfassung der Lernwirksamkeit durch die zahlreichen Testinstrumente gliedert sich der Ergebnisteil dieser Arbeit (vgl. Kapitel 6), aus Gründen der Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit, anhand der erhobenen Parameter (LZ (vgl. Kapitel 6.1), CL (vgl. Kapitel 6.2), UX (vgl. Kapitel 6.3), ELU (vgl. Kapitel 6.4) und Immersion (vgl. Kapitel 6.5)). Innerhalb dieser Kapitel findet in den entsprechenden Unterkapiteln ein Rückgriff auf die in Kapitel 4 erörterten Fragestellungen und Hypothesen statt. Die FF2 bis FF5 zugeordneten Kapitel weisen einen analogen Aufbau auf: Zunächst wird einleitend ein Bezug zu den Fragestellungen und Hypothesen hergestellt und die Voraussetzungen sowie Annahmen des jeweiligen Testverfahrens werden offengelegt. Darauf beruhend werden die Ergebnisse der empirischen Untersuchung dargestellt und schließlich werden Erkenntnisse daraus abgeleitet. Da FF1 darauf abzielt, mögliche theoretische Zusammenhänge zwischen den einzelnen Variablen der Testinstrumente nachzuweisen, wird die CLT als zentrales psychologisches Framework betrachtet, zu dem die weiteren Variablen in Bezug stehen. Dementsprechend werden in den Kapiteln 6.2.1 und 6.2.2 Zusammenhänge zum LZ, in den Kapiteln 6.3.1 und 6.3.2 Zusammenhänge zum Nutzungserlebnis, in den Kapiteln 6.4.1 und 6.4.2 Zusammenhänge zur ELU und in Kapitel 6.5.1 Zusammenhänge zur Immersion analysiert. Abschließend sind die zentralen Ergebnisse der Untersuchungen tabellarisch in Kapitel 6.6 zusammengefasst.

Diskussion, Fazit und Ausblick (Kapitel 7 bis 9)

Die in Kapitel 6 aufgeführten Einzelergebnisse und die zugrunde liegenden Theorien und Modelle (vgl. Kapitel 2.3 bis 2.8) bilden die Basis der Diskussion, in der die Einzelergebnisse in analoger Struktur zu Kapitel 6 diskutiert und, sofern möglich, Ergebnissen vergleichbarer Studien gegenübergestellt werden, sodass die Kapitelstruktur analog zu Kapitel 6 fortgeführt wird. In Kapitel 8 werden die zuvor einzeln diskutierten Ergebnisse unter Beantwortung der dieser Arbeit zugrunde liegenden Fragestellungen zusammengeführt und darauf aufbauend werden gemäß eines induktiven Vorgehens Schlussfolgerungen abgeleitet. Abschließend werden in Form eines Ausblicks (vgl. Kapitel 9) weitere Fragestellungen und zukünftige Forschungsfelder zur Untersuchung von AR-basierten Lernumgebungen aufgezeigt und ein Ausblick auf zukünftige Untersuchungen der Wirkzusammenhänge zwischen der CLT, dem Nutzungserlebnis, der ELU und der Immersion gegeben.

2 Theoretische Hintergründe

2.1 Augmented Reality

Augmented Reality ermöglicht es, die Realität mithilfe von unterschiedlicher Hardware durch virtuelle Komponenten interaktiv und in Echtzeit zu erweitern. Diese auf Azuma (1997, S. 2) basierende Definition enthält drei wesentliche Charakteristika von AR:

1. Kombination von Realität und Virtualität
2. Interaktivität in Echtzeit
3. findet im dreidimensionalen Raum statt

Abgeleitet aus dem ersten Punkt existieren nach Milgram und Kishinos (1994) *Mixed-Reality-Konzept* zwei gegensätzliche Umgebungen, die auf einem eindimensionalen Kontinuum abgetragen sind (vgl. Abb. 1): die reale (RE, Real Environment) und die virtuelle Umgebung (VE, Virtual Environment). Demnach liefert Mixed Reality die Möglichkeit, die unterschiedlichen Ausprägungen der Fusion von RE und VE entlang einer Achse zu beschreiben. Links steht die RE, bei der kein Einfluss durch computergenerierte Informationen besteht, und rechts die VE, in der nur computergenerierte Informationen enthalten sind. Zwischen diesen beiden Polen liegt AR, in der die Realität durch virtuelle Informationen ergänzt wird, und die Augmented Virtuality (AV), in der die Virtualität durch reale Informationen erweitert wird.

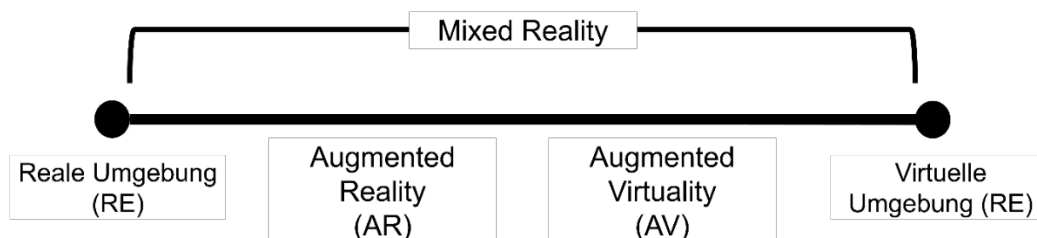


Abb. 1: Virtuality-Kontinuum (veränderte Darstellung nach Milgram & Kishino, 1994, S. 1322).

Auf einer technischen Ebene lassen sich drei essenzielle Komponenten festhalten, die AR ermöglichen (vgl. Abb. 2):

1. **Trigger**
2. **Hardware:** Sensoren, Prozessoren und Displays (Craig, 2013a, S. 70)
3. **Software (Darstellung virtueller Komponenten und Interaktion):** Erfassung der Realität, Sensor-Integration, App-Engine, Rendering (Craig, 2013b, S. 126)

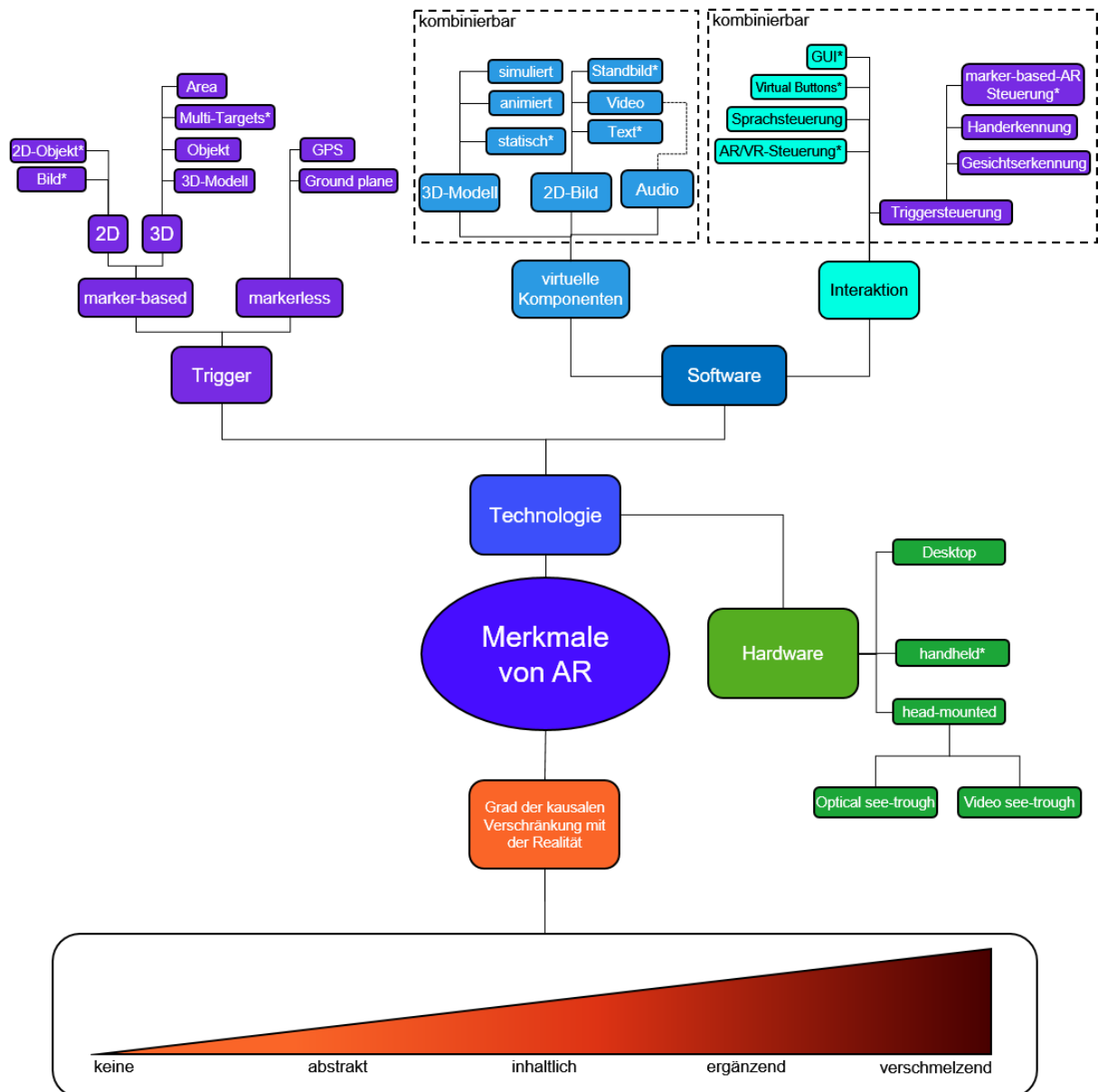


Abb. 2: Merkmale von Augmented Reality. Mit * markierte Merkmale finden im Rahmen dieser Arbeit Berücksichtigung.

2.1.1 Trigger

Der in diesem Zusammenhang benutzte Begriff des *Triggers* ist wörtlich als Auslöser zu übersetzen und stellt allgemein eine Aktion oder eine Information dar, die eine AR-Umgebung startet. Eine mögliche Einteilung in verschiedene Typen von AR lässt sich anhand der verwendeten Trigger erstellen. Die verschiedenen Wege, eine AR-Umgebung zu starten, werden anhand der von Johnson et al. (2010) vorgenommenen Kategorisierung beschrieben und im Einzelnen ausdifferenziert. Johnson et al. (2010) unterscheiden zwischen Marker-based und Marker-less AR. Trotz der stetig wachsenden technischen Möglichkeiten ist diese Einteilung nach wie vor gültig, erfordert jedoch eine genauere Beschreibung.

Eine Marker-based AR reagiert auf eine dargebotene visuelle Information, die von der Software mit einer Bibliothek abgeglichen wird. Findet sich die Information in der Software-Bibliothek, wird die AR-Umgebung gestartet, indem der Bibliothek zugeordnete virtuelle Informationen abgerufen und dargestellt werden. Die einfachste Form der Marker-based AR ist die sogenannte Image-based AR (Abb. 2, S. 9, *Bild*). Die Bandbreite möglicher Trigger der Image-based AR ist groß und reicht von der Erkennung abstrakter Piktogramme und Symbole bis hin zu Realaufnahmen, wodurch (mit technischen Einschränkungen) alles einen Trigger darstellen kann.

Bei dem Einsatz von Realaufnahmen als Trigger lassen sich zwei Ebenen der Einsatzmöglichkeiten identifizieren. Zum einen können die Realaufnahmen (z. B. das Foto eines plastischen Herzmodells) als Trigger dienen, zum anderen kann hierzu die im Foto abgebildete Realität genutzt werden (Abb. 2, S. 9, *2D-Objekt*) (i. d. F. das plastische Herzmodell). Letzteres Einsatzszenario eröffnet gerade im Bildungskontext große Potenziale, da eine stärkere Verschränkung zwischen der Realität und der Virtualität stattfinden kann (s. a. Kapitel 2.2). Damit eine Image-based AR von der Software gut erkannt wird, sollte das Triggerbild neben plattformspezifischen Vorgaben (Dateigröße, Dateiformat etc.) möglichst viele Details aufweisen, einen guten Kontrast besitzen und keine repetitiven Muster enthalten. Ein Blick auf den zeitlichen Verlauf der Entwicklung der Image-based AR zeigt, dass in den Anfängen Trigger genutzt wurden, die an QR-Codes erinnern. Dies liegt zum einen darin begründet, dass solche Trigger das Optimum der zuvor genannten Kriterien erfüllen, und zum anderen darin, dass die damalige Soft- und Hardware nicht in der Lage war, komplexere Trigger zu verarbeiten. Aufgrund der äußeren Ähnlichkeit dieser anfänglichen Trigger zu QR-Codes und eines vergleichbaren Nutzungsvorgangs (Abscannen von Marker/QR-Code, Aktion wird ausgelöst), ist es sinnvoll, diese voneinander abzugrenzen, denn die Funktionsweise unterscheidet sich grundlegend.

Die äußere Erscheinung eines QR-Codes resultiert aus der eingegebenen Information, die in Bits umgewandelt und durch schwarzweiße Bereiche repräsentiert wird. Somit ist der QR-Code selbst Informationsträger, wohingegen im Fall der Image-based AR die mit dem Trigger verknüpfte Information keinerlei Einfluss auf die visuelle Darstellung des Triggers hat. Weiterhin findet beim Scanvorgang des QR-Codes eine Decodierung statt, kein Abgleich mit einer Software-Bibliothek. Dennoch können QR-Codes aufgrund ihrer Erscheinung und der Erfüllung aller wesentlichen Gestaltungskriterien als Trigger im Rahmen einer Image-based AR genutzt werden.

Eine Weiterentwicklung innerhalb der Image-based AR stellt die technische Möglichkeit dar, Multi-Targets (PTC, 2020a) zu erstellen (Abb. 2, S. 9, *Multi-Targets*). Diese bestehen aus mehreren Triggerbildern, die zu einer definierten geometrischen Anordnung kombiniert werden

und dadurch die Erkennung und Verfolgung von allen Seiten ermöglichen (PTC, 2020a). Als Beispiel für einen kommerziellen Anwendungsfall dieser Technik kann der *Merge Cube* (Merge Labs, 2021) gesehen werden, der eine Vielzahl von 3D-Modellen für den Einsatz im Bildungsbereich bereithält. Eine weitere Möglichkeit, dreidimensionale Objekte zu augmentieren – also zu erweitern – bieten Objekt- und Modelltrigger (Abb. 2, S. 9, *Objekt, 3D-Modell*). Objekttrigger können aus kleineren Gegenständen, meist mithilfe plattformspezifischer Zusatzsoftware, erstellt werden. Die Erfassung der dreidimensionalen Informationen der Gegenstände erfolgt bspw. mittels zusätzlicher Scansoftware (z. B. Object Scanner, PTC, 2020b) oder durch die Kompilation perspektivischer Bilder (z. B. Object Targets, Wikitude, 2020). Dabei gelten die gleichen Gestaltungskriterien wie bei der Image-based AR: detail- und kontrastreich, keine repetitiven Muster und keine bis wenige bewegliche Teile. Modelltrigger hingegen basieren nicht direkt auf physischen Gegenständen, sondern benötigen zur Erkennung die digitalen 3D-Strukturdaten der Realobjekte. Daher sind diese besonders für industrielle Zwecke und spezielle Anwendungsfälle geeignet.

Mit der Popularität von Apps wie Instagram oder Snapchat hält ein weiterer Typus von AR Einzug in breite Anwenderschichten: die Gesichtserkennung (Abb. 2, S. 9, *Gesichtserkennung*). Die Apps sind in der Lage, Gesichtszüge zu erkennen und positionsgenau virtuelle Informationen einzublenden sowie bei Bewegung nachzuverfolgen. Sie werden jedoch von den Anbietern, entgegen ihrer eigentlichen Funktion, nicht als AR beworben, sondern als *Filter*. Die Besonderheit im Vergleich zu den zuvor beschriebenen AR-Typen besteht darin, dass die Trigger nicht statisch, sondern dynamisch sind, sodass die Anwendung nicht nur auf ein zuvor definiertes Gesicht festgelegt ist, sondern Gesichter als solche erkennt. Ein ähnliches, jedoch bisher nur selten anzutreffendes Funktionsprinzip stellt die Handerkennung (Abb. 2, S. 9, *Handerkennung*) dar. Wenn auch technisch möglich, liegt der Hauptfokus nicht auf der Überlagerung von 3D-Informationen über die Hände, sondern im Bereich der Interaktion mit 3D-Objekten und der Steuerung. Durch die Handerkennung und -nachverfolgung können bestimmte Gesten von der Software erkannt und Aktionen können ausgeführt werden. Somit wird die Nutzung eines Graphical User-Interface (GUI) weitgehend obsolet und die Nutzenden können direkt mit den virtuellen Informationen interagieren. Besonders in Einsatzszenarien mit Head-mounted Devices (HMD), bspw. die MS Hololens, in der die grafische Benutzungsschnittstelle (GUI) nicht bedienbar ist, können die Potenziale von AR weiter ausgeschöpft und eine höhere Immersion kann erreicht werden.

Im Gegensatz zu Marker-based AR benötigt Marker-less-AR keinen zuvor festgelegten visuellen Trigger und ist daher i. d. R. ortsunabhängig einsetzbar, wodurch sich breitere Anwendungsfelder erschließen. Es können bspw. virtuelle 3D-Objekte in der physischen Umgebung anhand realer Merkmale der Umgebung platziert werden, ohne dass ein Marker notwendig ist. Der häufigste Anwendungsfall besteht darin, dass eine ebene Fläche lokalisiert

wird, auf der die Augmentierung gestartet wird. (Abb. 2, S. 9, *Ground plane*). Ermöglicht wird diese Art der AR durch die fortschreitende Entwicklung leistungsstarker Smartphones und Tablet-PCs, indem eine Vielzahl von Informationen der Sensoren (Kamera, Gyroskop, Beschleunigungsmesser, haptische Sensoren und Ortungsdienste) zusammengefügt und zu einem Abbild der physischen Umgebung verarbeitet werden. Dieses Simultaneous-Localization-and-Mapping(SLAM)-Verfahren ermöglicht es einerseits, die Position des Geräts relativ zur Umgebung zu berechnen, und andererseits durch Erfassen von unterscheidbaren Merkmalspunkten mittels Kamera die Ortsveränderung zu berechnen (Google Developers, 2020). Somit kann den virtuellen Informationen ein fester Platz durch die Kartierung der physischen Umgebung zugeordnet werden, wodurch sich diese auch bei Abwenden der Kamera nicht bewegen und das Sichtfeld der AR-Umgebung deutlich erweitert wird.

Eine weitere Form der Marker-less AR ist die Location-based AR, die ebenfalls Ortungsdienste und Informationen der internen Sensoren nutzt (Abb. 2, S. 9, *GPS*). Das Abrufen der Informationen ist jedoch an zuvor festgelegte GPS-Koordinaten geknüpft. Anders als bei der zuvor beschriebenen Methode besteht bei der Location-based AR die Möglichkeit, einen direkten Bezug zwischen dem Standort und den dargebotenen Informationen herzustellen. McCall et al. (2011) beschreiben ein konkretes Beispiel, mit dem sich die historische Geschichte der Stadt Köln mithilfe einer Location-based AR erfahren lässt.

2.1.2 Hardware

Unabhängig von der Art des Triggers (Marker-based bzw. Marker-less AR) können die zum Abrufen der AR-Umgebungen notwendigen Geräte in drei Kategorien eingeteilt werden: *Desktop-, Handheld* und *Head-mounted Devices* (Abb. 2, S. 9), also in Geräte, die von den Nutzenden an einem festen Platz bedient (Desktop-), in der Hand gehalten (Handheld) oder am Kopf befestigt (Head-mounted) werden. Die Gemeinsamkeit aller Gerätetypen liegt in den drei Bestandteilen Sensoren, Prozessoren und Display. Sensoren erfassen Informationen über die reale Umgebung, um Positions- und Orientierungsdaten der Nutzenden für die AR-Anwendung nutzbar zu machen. Je nach Art und Anwendungsfall können unterschiedliche Sensoren und deren Zusammenspiel verwendet werden, um ein genaues Tracking (Verfolgung) zu ermöglichen.

Das am häufigsten anzutreffende Trackingverfahren stellt das optische Trackingverfahren via Kamera(-s) dar. Insbesondere bei der Image-based AR wird der Trigger durch die Kamera erkannt und virtuelle Informationen werden in Relation zum Trigger gerendert. Die Positionierung der virtuellen Informationen basiert hierbei auf der Triangulation besonderer Merkmalspunkte der Triggerbilder. Wird das Triggerbild außerhalb des Kamerasichtfelds bewegt, bricht die Augmentierung ab. Mittels zusätzlicher Informationen der Bewegungs- und

Beschleunigungssensoren kann das Tracking erweitert werden, sodass die Position mittels Algorithmus extrapoliert wird und die Augmentierung bestehen bleibt, sollte sich der Trigger abseits des Kamerasichtfelds befinden.

Weitere optische Trackingverfahren beruhen auf mehreren (Infrarot-)Kameras, die im Raum positioniert werden und so die Position der Nutzenden erfassen. Moderne AR-Trackingverfahren hingegen (insbesondere Markerless AR) beruhen auf dem SLAM-Verfahren, das mithilfe komplexer Berechnungen aus den Sensordaten eine Karte der unbekanntenen Umgebung generiert und gleichzeitig die Position der Nutzenden (das benutzte Gerät steht stellvertretend für die Nutzenden) innerhalb dieser Karte bestimmt. Prozessor (CPU) und Grafikprozessor (GPU) sind essenzielle Komponenten von AR-Systemen und sie sind für die Verarbeitung der Sensorinformationen, die Ausführung der AR-Anwendungen sowie die grafische Darstellung der digitalen Inhalte (bspw. 3D-Rendering der virtuellen Informationen) auf dem Display zuständig. Die Recheneinheiten können Bestandteile des Geräts oder, insbesondere bei rechenintensiven Vorgängen, ausgelagert sein. Mit der stetig fortschreitenden Entwicklung genügt die Rechenleistung der Geräte, um Sensorinformationen zu erfassen sowie zu verarbeiten und das AR-Tracking zu ermöglichen.

Die Hauptaufgabe des Displays ist es, Lichtsignale zu erzeugen, die auf die Augen der Nutzenden treffen und als visuelle Bilder wahrgenommen werden (Craig, 2013a, S. 92). Die Displayeinheit ist die Wiedergabeeinheit. Sie macht die Ergebnisse der internen Rechenvorgänge für die Nutzenden sichtbar und ermöglicht die Wahrnehmung einer Verschränkung zwischen Realität und Virtualität. Beim Display bestehen die größten Unterschiede zwischen den Gerätetypen: Im Fall von Desktop-Devices handelt es sich i. d. R. um stationäre Displays (Monitor oder Projektor mit Projektionsfläche), die mit einer Recheneinheit (Desktop-PC oder Laptop) verbunden sind. Das Hauptcharakteristikum besteht darin, dass sie stationär verwendet werden, sodass die Nutzenden zur Bedienung zu ihnen gehen müssen. Anwendungsbeispiele finden sich in Museen, in Geschäften und auf Messen, wo dieser Vorteil der Systeme genutzt werden kann, um die Aufmerksamkeit von Personen auf Exponate oder Produkte zu lenken. Da sie in solchen Szenarien für einen bestimmten Anwendungsfall konzipiert und konfiguriert sind, können die Fehleranfälligkeit und die Hindernisse für die Nutzenden, bspw. der vorherige Download einer App, minimiert werden.

Displays von Handheld Devices weisen i. d. R. kleinere Bildschirmdiagonalen auf als stationäre Displays, sodass diese Devices transportabel sind und längere Zeit erschöpfungsfrei von den Nutzenden getragen werden können. Die gängigsten Handheld Devices stellen derzeit Smartphones und Tablet-PCs dar, da sie breit in der Bevölkerung verfügbar sind und über die notwendigen Sensoren sowie über die erforderliche Rechenleistung verfügen, um AR-Anwendungen auszuführen. Die reale Umgebung wird hier

mit der Kamera erfasst und mit den virtuellen Informationen auf dem Display wiedergegeben. Eine Interaktion mit den virtuellen Objekten, sofern dies technisch realisiert wird, ist direkt über das Display und die GUI via Touch-Gestensteuerung möglich. HMD werden als Helm oder Brille von den Nutzenden am Kopf getragen und übertragen die AR direkt in deren Sichtfeld. Dabei werden zwei technische Umsetzungen unterschieden: *Optical See-through* und *Video See-through*. Bei *Optical See-through* wird im Gegensatz zu anderen Systemen die Realität nicht durch die Kamera wahrgenommen, sondern direkt mit den Augen durch eine transparente Projektionsfläche hindurch. Die Darstellung der virtuellen Informationen erfolgt ebenfalls auf dieser Projektionsfläche, sodass die Realität um digitale Inhalte erweitert wird. Anwendungsbeispiele sind die MS Hololens, Google Glass und Epson Moverio. Andere Hersteller nutzen die Technik, um bspw. Zusatzinformationen auf das Visier von Motorradhelmen (z. B. JARVISH, 2020) oder auf die Windschutzscheiben von Autos (z. B. Geiger, 2021) zu projizieren.

Bei der *Video-See-through*-Technologie wird wie bei Desktop- und Handheld Devices die Realität mittels stereoskopischer Kameras aufgenommen und auf einem Display vor den Augen der Betrachter wiedergegeben, sodass die Wahrnehmung der visuellen Realität nur auf dem Kamerabild beruht. Die größte Herausforderung stellt hierbei die Latenzzeit dar. Diese ist die Verzögerung zwischen dem Zeitpunkt, zu dem sich etwas bewegt, und der Änderung der Anzeige als Reaktion (Lincoln, 2017), sodass im Fall des Auftretens von Latenzzeiten die zeitliche Konsistenz unterbrochen wird. Um Latenzzeiten zu verhindern, ist eine hohe Rechenleistung erforderlich, da Kamera- und Sensorinformationen zum Abbilden der Realität und zum Scannen der Umgebung (vgl. SLAM) zusammengeführt werden müssen, während parallel dazu der Abruf von Bibliotheksinformationen zum Starten der AR, das Rendering der virtuellen Informationen im Realraum und die Darstellung auf dem Display stattfinden müssen. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Rechenleistung wird diese extern mithilfe leistungsstarker Computer vollzogen. Ein kommerzielles Produkt, das diese Art der AR-Anwendung unterstützt, ist die HTC Vive Pro. Diese ist primär eine VR-Brille, sie bietet Entwicklenden aber mittels Software-Development-Kit (SDK) die Möglichkeit, auf die Frontkameras zuzugreifen und diese für eine AR-Umgebung nutzbar zu machen.

2.1.3 Software

Durch das Zusammenspiel von Soft- und Hardware wird die Wiedergabe einer AR-Umgebung ermöglicht, indem die Software die Informationen der Hardware (Sensoren) verarbeitet (Prozessoren) und zur Darstellung (Display) aufbereitet an die Hardware weiterleitet. Doch nicht nur an der direkten Wiedergabe von AR-Anwendungen ist Software beteiligt, sondern auch an der Programmierung und Entwicklung der AR-Anwendung sowie an der Erstellung virtueller Informationen. Software, die an der Ausführung von AR-Anwendungen beteiligt ist,

kann in drei Komponenten untergliedert werden: Sensor-Integration, App-Engine und Rendering.

Während der Sensor-Integration werden Signale der Sensoren verarbeitet und für die Integration in der AR-Anwendung aufbereitet. Dieser Vorgang ist nicht auf eine einmalige Rechenoperation beschränkt, sondern findet kontinuierlich statt, um ein stabiles Tracking zu ermöglichen. Im Fall der Marker-based AR wird primär die Kamera genutzt, um einen Trigger zu erkennen sowie dessen Entfernung und Orientierung zur Kamera zu berechnen. Eine weitere Aufgabe der Sensor-Integration ist die sinnvolle Informationsverarbeitung verschiedener Sensordaten.

Die App-Engine ist die zentrale Einheit, in der alle Informationen zusammenfließen sowie verarbeitet und ausgegeben werden. Die Daten der Sensor-Integration und die Benutzereingaben werden zusammengeführt, um Prozessdaten über die korrekte Darstellung der virtuellen Informationen zu erstellen, die dann durch den Renderer in visuelle Signale für das Display umgewandelt werden. Abhängig von der darzustellenden Information (Grafik, Audio, 3D-Objekte, Haptik) kommen verschiedene Renderer zum Einsatz. Auch unterscheiden sich die Renderer hinsichtlich der Unterstützung durch die Entwicklungsumgebungen und der unterstützten Dateiformate. Ein Standard, der sich weitgehend in Programmen etabliert hat, basiert im Kern auf Open Graphics Language (OpenGL) und stellt eine Vereinfachung für die Entwicklung von AR-Anwendungen dar.

An der Entwicklung von Augmented-Reality-Anwendungen beteiligte Software

Augmented Reality gewinnt durch die technische Entwicklung auf Soft- und Hardwareebene stark an Bedeutung und Möglichkeiten, was sich auch an der Angebotsauswahl zeigt. Aufgrund des schnellen Wandels, bei dem neue AR-Plattformen entstehen und alte verschwinden oder miteinander fusionieren, ist eine vollumfängliche Marktanalyse an dieser Stelle wenig zielführend. Dennoch wird im Folgenden eine Kategorisierung vorgenommen, bei der die Entwicklung anhand ausgewählter Beispiele skizziert wird und Kriterien zur Auswahl der AR-Plattformen beschrieben werden. Aufgrund der breiten Verfügbarkeit an Handheld Devices stellen diese den derzeit häufigsten Anwendungsfall von AR in Schulen dar. Diese AR-Anwendungen lassen sich grob in drei Kategorien einteilen:

- eigenständige AR-Apps mit integrierter Bibliothek
- AR-Apps mit externer Bibliothek im Web
- Web-AR

Abhängig von dem angestrebten Endprodukt und dem Anwendungsfall ergeben sich unterschiedliche Vorgehen zur Entwicklung. Fast allen Anwendungsfällen liegen jedoch AR-Bibliotheken zugrunde. Letztere unterstützen die Entwicklung deutlich, da die benötigten AR-

Funktionalitäten integriert sind und nicht von Grund auf neu programmiert werden müssen. Die Auswahl einer geeigneten AR-Bibliothek ist jedoch an eine Vielzahl von Kriterien geknüpft, die später in diesem Kapitel beschrieben werden.

Im Fall der Programmierung eigenständiger Apps bieten viele Anbieter eigene SDKs an, in denen AR-Bibliotheken enthalten sind, die in eine Entwicklungsumgebung integriert sind oder eigenständig genutzt werden können. Eine der bekanntesten Entwicklungsumgebungen, die die Integration der meisten SDK unterstützt, ist Unity3D. Aufseiten der SDK bzw. Frameworks ist die Auswahl deutlich größer: ARKit (Apple), ARCore (Google), Vuforia SDK (PTC) und Wikitude SDK.

Der größte Einflussfaktor für die Auswahl der SDK bei der Entwicklung eigenständiger AR-Apps ist die Zielplattform (i. d. R. Android und/oder iOS), da längst nicht alle SDKs eine Cross-Plattform-Unterstützung bieten. Beispielsweise sind ARCore (Google, Android) und ARKit (Apple, iOS) strikt an das jeweilige Betriebssystem gebunden. Für den Fall, dass eine AR-App sowohl für Android als auch für iOS entwickelt werden soll, bietet sich daher entweder ein SDK mit integrierter Cross-Plattform-Unterstützung oder die Nutzung von Unitys AR Foundation an, die ARKit und ARCore zusammenführt und damit eine faktische Unterstützung beider Plattformen ermöglicht. Neben der Zielplattform der Veröffentlichung sollten weitere Kriterien bei der Auswahl der SDK berücksichtigt werden: Preis und Lizenzmodell, unterstützte AR-Funktionalitäten und Performance, Programmiersprache, Support (direkter Support, Dokumentation, Tutorials) und Umfang unterstützter Geräte.

Im Fall der bereits genannten SDKs existieren kostenlose Lizenzen, die zur Entwicklung und zum Prototyping genutzt werden können, jedoch fallen spätestens bei der Veröffentlichung in den einschlägigen App-Stores Kosten an, die von Beginn an eingeplant werden sollten. Dem konkreten Anwendungsfall entsprechend werden unterschiedliche AR-Funktionalitäten benötigt, die sich je nach Anbieter auch in ihrer Performance unterscheiden. Daher sollte bereits im Vorfeld eine konkrete Vorstellung über die AR-Umsetzung bestehen, sodass eine zielführende Auswahl des SDK getroffen werden kann. Abhängig von den Programmierkenntnissen kann die Auswahl durch die verwendete Programmiersprache limitiert sein. Damit einhergehend kann der verfügbare Support eine bedeutende Rolle spielen. Generell gilt: Je verbreiteter das SDK ist, desto besser ist der Support durch die Community oder den Anbieter selbst. Ein weiterer erheblicher Faktor ist der Umfang der unterstützten Geräte, woraus sich die potenzielle Markterschließung ergibt. Hiervon betroffen ist in erster Linie Googles ARCore. Anders als bei Apples ARKit kommen hier Soft- und Hardware nicht vom selben Hersteller, sodass sich die verbaute Hardware in Android-Geräten deutlich je nach Hersteller unterscheidet und eine Unterstützung aller Android-Hardwares deutlich schwerer zu

realisieren ist. Hiervon betroffen sind vor allem preisgünstige Geräte, denen bestimmte Hardwarekomponenten fehlen, und Geräte mit geringem Marktanteil.

AR-Anwendungen mit externer Bibliothek bestehen aus zwei wesentlichen Komponenten: einer Wiedergabe-App für die AR-Umgebung für Smartphones und Tablet-PCs sowie einer Entwicklerumgebung zur Erstellung und Bereitstellung der AR-Umgebung am PC. Beide Komponenten werden von dem jeweiligen Anbieter (bspw. Wikitude) bereitgestellt, sodass eine Veröffentlichung in den App-Stores entfällt. Während in eigenständigen Apps die Möglichkeit besteht, sämtliche relevanten Daten zur Nutzung der App in selbige zu integrieren und eine Offline-Nutzung zu erlauben, ist dies bei AR-Anwendungen mit externer Bibliothek nicht machbar, da die Apps zum Abruf der Informationen mit einem Server kommunizieren müssen. Der Server bildet also die Schnittstelle zwischen der Entwicklerumgebung und der AR-App. Die Entwicklerumgebung kann durch eine zusätzliche Software, die einen Download und eine Installation erforderlich macht, oder durch browserinterne Lösungen realisiert sein. Die Kriterien zur Auswahl des Anbieters stimmen mit den zuvor genannten Kriterien zur Auswahl einer SDK weitgehend überein und unterscheiden sich lediglich in ihrer Gewichtung. Die Zielplattform spielt bspw. eine untergeordnete Rolle, da die Anbieter i. d. R. eine Wiedergabe-App sowohl für Android als auch für iOS Apps bereitstellen. Die Preis- und Lizenzmodelle, unterstützte AR-Funktionen und Support unterscheiden sich je nach Anbieter erheblich, was unbedingt berücksichtigt werden sollte. Tiefgreifende Programmierkenntnisse sind in aller Regel nicht erforderlich, sodass eine breite Zielgruppe potenzieller Entwickelnder angesprochen werden kann.

Limitationen sind hingegen in der eingeschränkten Individualisierbarkeit, in der externen Speicherung von Daten, die eine Serververbindung erforderlich machen, und in der starken Abhängigkeit vom Anbieter zu sehen. Beschließt ein Anbieter, den Dienst einzustellen oder das Preismodell zu ändern, wirkt sich dies direkt auf die Nutzenden und die Entwickelnden aus. Dass dies keine abstrakte Befürchtung ist, zeigt das Beispiel Aurasma: Nach Übernahme von HP (Hewlett Packard) wurde die AR-Plattform unter dem Namen *HP Reveal* fortgeführt und kurz danach wurden im Rahmen einer Umstrukturierung des Nutzungsmodells alle bis dahin erstellten Daten der Nutzenden gelöscht und Funktionalitäten wurden stark eingeschränkt (Auganix, 2023).

Eine weitere Art von Software zur Entwicklung einer AR-Umgebung stellt die browserbasierte AR oder auch Web-AR dar. Anders als bei den zuvor beschriebenen Möglichkeiten einer AR-Umsetzung ist zur Entwicklung am PC und zur Wiedergabe auf PCs, Smartphones und Tablets hier keine zusätzliche Software erforderlich, da die benötigten Werkzeuge über Programmschnittstellen (Application Programming Interfaces) auf den Browser zugreifen können. Die Vorteile gegenüber anderen AR-Anwendungen bestehen darin, dass die

Einstiegsbarriere durch die sofortige Nutzbarkeit herabgesetzt wird, da ein zusätzlicher Download entfällt sowie die AR-Umgebung uneingeschränkt bereitgestellt und mit anderen Nutzenden via Link geteilt werden kann. Eine Open-Source-Option und damit kostenlose, frei verfügbare Möglichkeit, AR-Umgebungen im Browser zu gestalten, stellt die Kombination aus AR.js und A-Frame dar. Beides sind Software-Bibliotheken, die miteinander die webbasierte AR-Umgebung ermöglichen. Während mithilfe von A-Frame die Darstellung dreidimensionaler Objekte im Browser realisiert wird, erlaubt AR.js die Implementierung der AR-Funktionen. Um die Bibliotheken nutzen zu können, müssen diese auf einem lokalen oder auf einem Webserver bereitgestellt werden, sodass die Nutzung nicht an eine Internetverbindung geknüpft sein muss. Zur Entwicklung eigener Web-AR-Umgebungen sollten bereits Kenntnisse in der Web-Entwicklung (javascript, HTML, CSS) vorhanden sein. Aufgrund des offengelegten Quellcodes und der steigenden Bedeutung von AR wächst die Zahl der Entwickelnden – und damit die Zahl an Tutorials, gut protokollierten Anwendungsszenarien und in Zukunft sicherlich auch die Anzahl unterstützter AR-Funktionen.

Software – virtuelle Komponenten (Abb. 2, S. 9, *virtuelle Komponenten*)

Eine wesentliche Komponente von AR sind die darzustellenden virtuellen Informationen. Im Folgenden werden diese anhand ihrer Eigenschaften voneinander abgegrenzt und Informationen zur Beschaffung sowie Erstellung der Medien werden gegeben. Generell können drei Medientypen unterschieden werden (vgl. Abb. 2, S. 9):

- 2D-Bilder
- 3D-Modelle
- Audio

Zur Beschaffung der unterschiedlichen Medien bestehen drei Wege: der Erwerb über Stock-Plattformen, die eigene Erstellung oder die individuelle Erstellung durch Drittanbieter. Bei dem Erwerb von Medien über Stock-Plattformen sollte ein besonderes Augenmerk auf die eventuell anfallenden Kosten, auf das Urheberrecht und auf die Lizenzbestimmungen gelegt werden. Es werden häufig die Lizenzen der Creative Commons herangezogen, die die Nutzungsbedingungen des jeweiligen Mediums beschreiben. Ein weiterer zu beachtender Punkt ist das verfügbare Dateiformat. Es sollte darauf geachtet werden, dass das angebotene Dateiformat von der AR-Anwendung unterstützt wird oder eine Umwandlung möglich ist. Sollte für die Erstellung eines Mediums ein Drittanbieter beauftragt werden, empfiehlt es sich, diese Punkte ebenfalls im Vorfeld zu klären und bei der Kostenaufstellung zu berücksichtigen. Die eigene Erstellung von digitalen Medien geht mit dem Erhalt des vollumfänglichen Urheberrechts einher.

2D-Bilder

Zur Erstellung von 2D-Grafiken (Abb. 2, S. 9, *Standbild*) können zwei Arten von Software verwendet werden: Vektor-Grafikprogramme und Raster-Grafikprogramme. Vektor-Grafiken bestehen aus einfachen geometrischen Formen wie Linien, Kreisen, Polygonen oder Kurven, die sich zu komplexen Formen zusammensetzen lassen. Die Nutzung geometrischer Formen ermöglicht eine mathematische Beschreibung, sodass sich diese Formen z. B. durch den Mittelpunkt, den Radius oder die Länge vollständig definieren lassen. Der Vorteil von Vektor-Grafiken gegenüber Raster-Grafiken liegt in der beliebigen Skalierbarkeit ohne Qualitätsverlust. Daher eignen sich Vektor-Grafiken besonders zur Illustration von Logos, Diagrammen oder GUI-Elementen. Programme zum Zeichnen von Vektorgrafiken sind bspw. Adobe Illustrator oder CorelDraw.

Raster-Grafiken setzen sich aus Bildpunkten (Pixeln) mit einem definierten Farbwert zusammen, die in einem Raster angeordnet sind. Die Anzahl der Pixel pro Fläche wird als *Punktdichte* bezeichnet und durch den Dots-per-Inch-Wert beschrieben. Ein weiteres Qualitätskriterium stellt die Farbtiefe dar, die die mögliche Differenzierung von Farb- und Helligkeitswerten angibt. Hierzu wird am häufigsten der 8-Bit-Rot-Grün-Blau(RGB)-Farbraum mit rund 16,8 Millionen (theoretisch) möglichen Farben verwendet. Der RGB-Farbraum basiert auf den drei Grundfarben (Kanälen) Rot, Grün und Blau. Aus dem additiven Mischen der drei Kanäle ergibt sich ein entsprechender Farbwert, der einem Pixel zugeordnet wird. Anders als Vektor-Grafiken werden Raster-Grafiken im klassischen Anwendungsfall nicht mittels Software am PC von Grund auf neu erstellt, sondern aus externen Quellen (bspw. Kamera oder Scanner) in die Software geladen und dort bearbeitet. Daher eignen sie sich besonders zur digitalen Fotobearbeitung, bei der das ganze Bild angepasst (Weißabgleich, Helligkeit, Kontrast etc.) wird oder lokale Änderungen (Entfernen von Bildinhalten, Retusche) vorgenommen werden.

Zu den Standard-Dateiformaten von Raster-Grafiken gehören Bitmap, Joint Photographic Experts Group (JPEG), Graphics Interchange Format (GIF) und Portable Network Graphics (PNG). Die Unterschiede der einzelnen Dateiformate liegen in der möglichen Farbtiefe, der Komprimierung (und damit einhergehenden Verlusten), der Dateigröße, der Möglichkeit, Transparenz darzustellen, und der Erstellung kurzer Animationen. Bitmap-Dateien sind unkomprimierte, verlustfreie und dadurch vergleichsweise große Bilddateien. Es werden Farbtiefen von 1, 4, 8, 16 oder 32 Bit erlaubt. Transparenz und Animationen sind hingegen nicht möglich. Bei JPEG-Dateien handelt es sich hingegen um komprimierte Bilddateien mit geringem Qualitätsverlust und geringer Dateigröße. Erlaubt sind Farbtiefen von 8 und 12 Bit, wobei 8 Bit die gebräuchlichste ist. Transparenz und Animationen sind nicht möglich.

Die GIF-Dateien sind komprimierte, verlustfreie Bilddateien mit geringer Dateigröße. Eine Besonderheit von GIF-Dateien besteht darin, dass maximal 256 verschiedene Farben dargestellt werden können, die jedoch beliebig aus einem 24-Bit-RGB-Farbraum zusammengesetzt sein können. Dies hat zur Folge, dass zwar aufgrund der Komprimierung kein Verlust stattfindet, jedoch die Bildqualität wegen der begrenzten Anzahl verschiedener Farben stark beeinträchtigt sein kann. Weiterhin kann eine der 256 Farben eine Transparenzfarbe sein, sodass Transparenz zwar möglich ist, aber nicht graduell einstellbar. Eine weitere Besonderheit des GIF-Formats besteht in der Erstellung von kurzen Animationen, indem eine Bildreihenfolge abgespielt werden kann.

Bei PNG-Dateien handelt es sich um verlustfrei komprimierbare Bilddateien, die Vorteile des JPEG- und des GIF-Formats kombinieren. Sie haben wie JPG-Dateien eine 8-Bit-Farbtiefe und können daher rund 16,8 Millionen Farben darstellen, sind jedoch auch nach Komprimierung deutlich größer. Zusätzlich ist der RGB-Farbraum um den sogenannten Alphakanal ergänzt, was eine graduelle Einstellung der Transparenz ermöglicht. Animationen sind hingegen nicht realisierbar. Die Anzahl an Bildbearbeitungssoftwares für Raster-Grafiken ist hoch, hierzu zählen bspw. Adobe Photoshop oder das Open-Source-Programm GIMP. Eine Konvertierung von Vektor-Grafiken in Raster-Grafiken ist problemlos möglich, umgekehrt ist jedoch mit Einschränkungen zu rechnen, sodass ggf. Pfade manuell nachgezeichnet oder korrigiert werden müssen.

Eine Sonderstellung von 2D-Grafiken nehmen Videos ein (Abb. 2, S. 9, *Videos*), da bei deren Erstellung bzw. digitaler Bearbeitung Raster-Grafiken, Vektor-Grafiken, weitere Videos und Audioinformationen zusammengeführt werden können. Das Endprodukt enthält jedoch, unabhängig von den eingefügten Quelldateien, nur einen Videokanal und einen Audiokanal. Der Videokanal basiert auf der zeitlichen Abfolge vieler einzelner Raster-Grafiken (Bildwiederholungsrate), sodass auch hier die zuvor beschriebenen Eigenschaften wie Pixeldichte (Auflösung) und Farbtiefe zum Tragen kommen. Im Kontext von AR, insbesondere auf Handheld Devices, bestehen mehrere Möglichkeiten zur Einbindung, die jedoch didaktisch zu hinterfragen sind. Ein Video kann im Rahmen einer AR-Anwendung prinzipiell auf zwei Arten eingebunden sein: völlige Überlagerung der Realität oder teilweise Überlagerung der Realität. Bei ersterer Option wird das Video nach Erkennen eines Triggers im Vollbildmodus gestartet, wodurch die AR-Umgebung faktisch unterbrochen wird. Dieses Szenario könnte bspw. ebenso mit einem QR-Code und einem hinterlegten YouTube-Link realisiert werden.

Bei der teilweisen Überlagerung der Realität wird das Video in den Realraum projiziert, sodass der Eindruck eines Fernsehers oder einer holografischen Tafel entsteht. Dies stellt zwar gegenüber einer völligen Überlagerung ein sinnvolleres Szenario dar, jedoch ergeben sich anwendungspraktische Bedenken. Zum einen spielt die Displaygröße des *Handheld Devices*

eine Rolle, da das Video nur einen kleinen Teil des ohnehin begrenzten Displays einnimmt. Zum anderen ergeben sich Probleme bei der Umsetzung der Steuerelemente des Videos. Um den disruptiven Charakter eines Videos in AR-Umgebungen zu reduzieren, könnten teiltransparente Videos eingesetzt werden. Diese bieten die Möglichkeit, das rechteckige Videoformat aufzubrechen, und das Potenzial, zu einer immersiven AR-Erfahrung beizutragen. Denkbar wäre hier eine Videoaufzeichnung eines Tutors vor einem Greenscreen, der mit *Hologramm-Effekt* als Avatar in der AR-Umgebung erscheint und Informationen darbietet.

3D-Modelle

3D-Modelle (Abb. 2, S. 9, *3D-Modell*) werden durch Software gerendert und sind häufiger Bestandteil von AR-Umgebungen, da sich ihre räumliche Repräsentation in der Realität optimal erfassen lässt. Da 3D-Objekte mit dem realen Raum in Bezug gesetzt werden, wird der Tiefeneindruck im Vergleich zur Darstellung auf einem Monitor verstärkt. Die Wiedergabe der 3D-Modelle in der AR-Umgebung kann sowohl statisch als auch dynamisch erfolgen. Im Fall einer statischen Wiedergabe ist das in die Realität projizierte 3D-Objekt unveränderlich und entspricht einem Anschauungsmodell. Die dynamische Wiedergabe lässt sich hingegen in animierte (nicht durch Eingaben beeinflussbare) und simulierte (durch Eingaben beeinflussbare) 3D-Modelle differenzieren. Bei allen 3D-Modellen handelt es sich um Vektoren in einem kartesischen Koordinatensystem. Die Vektoren bilden Polygone und geben die Form des 3D-Modells wieder, ähnlich wie ein Drahtgerüst. Dieses Polygongerüst wird auch als *Mesh* bezeichnet und enthält noch keine Farbinformationen. Je mehr Polygone ein 3D-Modell besitzt, desto detaillierter und rechenintensiver ist die Darstellung. Daher sollte bei einer AR-Anwendung, in Abhängigkeit von der Rechenleistung des Zielgeräts, die Polygonanzahl der 3D-Modelle im Blick behalten werden, um eine adäquate Balance zwischen der Qualität der Darstellung und der Qualität der Wiedergabe zu gewährleisten.

Neben dem Mesh wird zum Rendering des 3D-Modells Material und Textur benötigt. Die Textur enthält Informationen zur Farbwiedergabe und das Material die nötigen Informationen wie einfallendes Licht auf die Oberfläche des 3D-Modells behandelt wird. Zur Erstellung eines 3D-Modells existieren vergleichbare Vorgehensweisen wie bei 2D-Grafiken. Sie können von Grund auf neu modelliert werden. Hierzu stehen in den einschlägigen Grafikprogrammen geometrische Formen wie Würfel, Kugeln und Zylinder als Basis zur Verfügung. Diese können mit verschiedenen Werkzeugen bearbeitet werden, um die gewünschte Form zu erzielen. Existiert das gewünschte Modell bereits in der Realität, bieten Photogrammetrie oder professionelle 3D-Scanner Möglichkeiten, dieses zu digitalisieren. Photogrammetrie stellt ein kostengünstiges Verfahren dar, mit dem auf Grundlage mehrerer multiperspektivischer Bilder die realen Modelle als 3D-Modelle berechnet werden. Die 3D-Modelle können anschließend

manuell bearbeitet werden. Professionelle 3D-Scanner sind zwar mit hohen Anschaffungskosten verbunden, liefern dafür aber meist genaue, qualitative dreidimensionale Abbilder der Realität, die weniger digitale Nachbearbeitung erfordern.

Wie auch bei 2D-Grafiken existiert für 3D-Objekte eine unübersichtliche Anzahl an Dateiformaten. Dies liegt vor allem an den softwareeigenen Formaten, die eine Bearbeitung zwischen unterschiedlichen Programmen erschweren. Dennoch unterstützen nahezu alle 3D-Grafikprogramme auch neutrale Dateiformate, um den Dateiaustausch zu ermöglichen. Hierzu zählen: Stereo Lithography, Wavefront, Filmbox (FBX) und Collada. Stereo Lithography ist ein neutrales Dateiformat und wird bevorzugt für Modelle zum 3D-Druck verwendet, da es Material, Textur und Animationen ignoriert und eine kompakte Dateigröße ermöglicht. Wavefront-Dateien sind ebenfalls neutral und verfügen über die Dateierweiterung *.obj*. Anders als bei Stereo-Lithography-Dateien werden Informationen für Material und Textur in einer zugehörigen Datei gespeichert und so nutzbar gemacht. Animationen werden hingegen nicht unterstützt. Wavefront gehört zu den gebräuchlichsten Austauschformaten von 3D-Daten und findet breite Anwendung in digitalen 3D-Umgebungen. Bei FBX handelt es sich um ein softwareeigenes Dateiformat (Autodesk), aufgrund der weiten Verbreitung in der Film- und Videospieleindustrie findet es jedoch breite Unterstützung in relevanten Programmen. FBX-Dateien unterstützen Material, Textur, Animationen und weitere Informationen (Licht, Kameraposition etc.) und können problemlos in Unity 3D zur Entwicklung von AR-Anwendungen genutzt werden. Collada-Dateien (*.dae*) werden ebenfalls gerne in der Film- und Videospieleindustrie eingesetzt und stellen im Gegensatz zu FBX-Dateien ein neutrales Dateiformat dar, das ebenfalls Informationen zu Material, Textur und Animationen beinhaltet. Zu den bekanntesten 3D-Grafikprogrammen gehören neben dem Open-Source-Programm Blender kommerzielle Programme wie Autodesk 3ds MAX, Cinema4D und Autodesk Maya.

Audio

Obwohl AR primär als visuelles Medium wahrgenommen wird, kann die Implementierung von auditiven Informationen wesentlich zum Nutzungserlebnis beitragen (Abb. 2, S. 9, *Audio*). Der Audiokanal kann bspw. dazu genutzt werden, die visuellen Elemente einer AR-Umgebung durch passende Umgebungsgeräusche anzureichern (Wal als 3D-Modell, der von Walgesang begleitet wird), um Informationen zu vermitteln (da lange Textpassagen in AR nicht zielführend sind, z. B. O'Shea et al., 2009) oder um Instruktionen zur AR-Umgebung zu geben (ein sprechender Avatar, der Arbeitsaufträge gibt, z. B. Dede, 2009).

Bei der Nutzung von Audioinformationen muss bei der Entwicklung der praktische Anwendungsfall berücksichtigt werden. Sollten die Audioinformationen essenziell zur Nutzung der AR-Anwendung sein, sollte ein entsprechender Hinweis gegeben werden, da gerade Handheld Devices stumm oder zu leise geschaltet sein könnten. Ebenso kann der Ort der

Nutzung entscheidend sein. Soll die AR-App im öffentlichen (Stadt-)Raum genutzt werden, können Umgebungsgeräusche die Nutzungsqualität beeinflussen und Kopfhörer notwendig machen. Damit einhergehend können bei der Verwendung von Kopfhörern die Umgebungsgeräusche auch vollständig überlagert werden. Dies kann nützlich sein, um die Aufmerksamkeit auf die AR-Umgebung zu fokussieren. Andererseits können Umgebungsgeräusche auch als Teil des AR-Erlebnisses wertvoll sein und so verloren gehen. Werden AR-Umgebungen für HMDs mit integrierten Kopfhörern konzipiert, können Audioinformationen gezielter bei der App-Entwicklung berücksichtigt werden. Zukünftige AR-Brillen könnten statt mit Kopfhörern auch mit Knochenschalleitung ausgestattet sein, wodurch digitale Audioinformationen über das HMD ausgegeben werden können, ohne die Umgebungsgeräusche zu unterdrücken. Die Erstellung von Audiodateien kann entweder synthetisch mittels Software erfolgen oder durch digitale Aufnahmen der Realität. Die so erstellten Aufnahmen können mittels Software vielfältig bearbeitet und für den AR-Anwendungsfall aufbereitet werden. Eine beliebte freie Software, die für Einsteiger und Fortgeschrittene geeignet ist, stellt das Programm Audacity dar.

Software – Interaktion (Abb. 2, S. 9, *Interaktion*)

Eine entscheidende Komponente, die im Fall von AR unmittelbar zwischen der Realität und der Virtualität steht, sind die Möglichkeiten zur Interaktion mit den virtuellen Informationen. Da die Benutzungsschnittstellen intensiv in Kapitel 2.4 behandelt werden, werden an dieser Stelle kurz AR-spezifische Interaktionsmöglichkeiten erörtert. Dazu gehören die bereits angesprochenen Möglichkeiten der Hand- und Gesichtserkennung. Diese haben als Besonderheit, dass sie als Trigger agieren, aber auch Möglichkeiten zur Interaktion bieten, sodass durch entsprechende Gesten virtuelle Komponenten gesteuert werden können. Als weitere Besonderheit ist die AR-/VR-Steuerung anzusehen, die mithilfe der verbauten Sensoren die Position des Geräts im Raum erkennt und so eine 360°-Betrachtung sowie Navigation im Raum durch Bewegen der Kamera ermöglicht. Die Nutzung ist im Falle von AR mit einer Lupe vergleichbar: Durch Veränderung der Distanz zwischen Tablet und Trigger (Marker-based AR) bzw. Tablet und 3D-Objekt (Markerless AR), lässt sich das Objekt vergrößern oder verkleinern. Weiterhin kann das Objekt durch Bewegung des Tablets im Raum oder der Rotation des Triggers von allen Seiten betrachtet werden.

2.2 Etablierte Unterrichtsmedien

Nach Spörhase-Eichmann (2015, S. 156) sind „Medien [...] Mittler“ zwischen Lerner und Lerngegenstand. Diese weite Auffassung eines Mediums macht eine zusätzliche Kategorisierung und Begriffsschärfung notwendig, da hiernach alles ein Medium darstellen kann. Gemäß dieser Definition stellen auch Lehrende ein Medium dar, wodurch zwischen personalen und apersonalen Medien (Killermann et al., 2011; Spörhase-Eichmann, 2015; Wokittel, 1994) unterschieden werden kann. Nach Auffassung von Pross (1972) dienen Medien der Kommunikation zwischen Sender und Empfänger, sodass diese gemäß ihrer Situiertheit kategorisiert werden können.

Primärmedien sind Mittel des menschlichen Elementarkontakts (personale Medien), die keine technischen Hilfsmittel erfordern. Zur Kommunikation müssen Sender und Empfänger immer zur gleichen Zeit am gleichen Ort sein. Als Beispiele sind hier Sprache, Mimik und Gestik zu sehen. Im Gegensatz zu Primärmedien ermöglichen Sekundärmedien den zeitlich unabhängigen Einsatz zwischen Sender und Empfänger und bedürfen zur Herstellung, jedoch nicht zur Wiedergabe auf Empfängerseite, technischer Geräte. Die räumliche Situiertheit ist zweitrangig, sodass Sekundärmedien auch den Ort wechseln können, entscheidend ist aber die zeitlich getrennte Nutzung. Unter Sekundärmedien fallen bspw. Fotografien oder Zeitungsartikel, da auf der Seite des Sendenden zur Erstellung Geräte (Kamera bzw. Drucker) benötigt werden und die Wahrnehmung der darin enthaltenen Informationen zeitlich und ggf. örtlich getrennt und ohne Hilfsmittel auf Seite der Empfangenden verläuft.

Tertiärmedien sind durch die räumliche Trennung zwischen Sendenden und Empfangenden charakterisiert. Zur Herstellung und Wiedergabe sind technische Geräte erforderlich. Die Gleichzeitigkeit der Kommunikation in Kombination mit der raumübergreifenden Eigenschaft ist die Voraussetzung dafür, dass Tertiärmedien bidirektional verlaufen können, sodass Empfangende auch zu Sendenden werden. Als Beispiel für Tertiärmedien kann ein Telefon gesehen werden, da auf beiden Seiten zur Kommunikation technische Geräte vorhanden sein müssen. Mit der fortschreitenden Entwicklung der Computertechnologie schlägt Faßler (1997, S. 147) vor, die von Pross (1972) aufgestellte Medienkonzeption um Quartärmedien zu erweitern. Dabei ist jedoch festzuhalten, dass sich allein durch computergestützte Medien noch keine medientheoretische Neukonzeption ergibt. Entsprechend den zuvor beschriebenen Kriterien fällt bspw. die Videotelefonie, obwohl computergestützt und digital codiert, unter die Tertiärmedien.

Quartärmedien zeichnen sich durch interaktive Systeme zur Kommunikation aus, sodass die Sendenden und die Empfangenden nicht direkt miteinander kommunizieren, sondern räumlich und zeitlich getrennt über interaktive Systeme. Diese interaktiven Systeme enthalten alle eine hohe Zahl an potenziellen Informationen (Daten), aus denen durch Interaktion mit dem System

die für die Nutzenden relevanten Informationen generiert werden. Somit erhalten die Empfangenden durch ihre Interaktion jeweils abgestimmte, personalisierte Informationen. Ein Beispiel stellen Navigationssysteme dar. Diese enthalten in ihrer einfachsten Form digitale geographische Daten (Karten), aus denen durch Interaktion (Eingabe Start- und Zielort) eine personalisierte Route generiert wird. Auch wenn die Rezipienten mithilfe eines interaktiven Systems unmittelbar mit sich selbst kommunizieren, stammen das System und dessen Inhalte von einem Hersteller. Darüber hinaus kann auch die Kommunikation zwischen dem Empfangenden und den Sendenden mit und über das interaktive System stattfinden.

Bei dieser allgemeinen Medienklassifikation werden Medien primär als Informationsvermittler begriffen und die mediale Funktion als Informationsträger wird weitgehend zurückgestellt. Werden Medien als Informationsträger verstanden, bietet sich, gerade im biologiedidaktischen Kontext, eine Einteilung anhand des Abstraktionsgrads nach Darstellungsformen an (vgl. Abb. 3, S. 27). Nach Killermann et al. (2011, S. 157) gelten im Biologieunterricht „originale Naturobjekte“, bspw. lebende Pflanzen, lebende Tiere und der Mensch, als Medien mit dem geringsten Abstraktionsgrad. Sie sind „Grundlage der biologischen Erkenntnisgewinnung.“ Spörhase-Eichmann (2015, S. 158) verwendet hingegen den Begriff der „Realobjekte“, der neben den Lebewesen auch Präparate inkludiert. Realobjekte zeichnen sich besonders dadurch aus, dass sie mit mehreren Sinneskanälen erfasst werden können, emotionale Reaktionen hervorrufen können, Primärerfahrungen ohne didaktische Aufbereitung ermöglichen und das Erlernen der fachgemäßen Arbeitsweisen erlauben (Berck & Graf, 2010; Killermann et al., 2011; Spörhase-Eichmann, 2015).

Ausgehend von den Realobjekten stellen *Nachbildungen* die nächste Abstraktionsebene dar. Sie sind dreidimensionale, physische und originalgetreue Abbilder von Realobjekten. Während es sich bei Präparaten um tote Organismen oder Teile davon handelt, entstehen Nachbildungen aus anderen Materialien unter Verwendung bestimmter Herstellungstechniken. Nachbildungen können Abgüsse oder Kunststoffnachbildungen wie das häufig in biologischen Sammlungen anzutreffende menschliche Skelett sein. *Naturbilder, -filme und -geräusche* bilden ähnlich wie Nachbildungen Realobjekte ab, jedoch auf zweidimensionaler Ebene sowie unter Ausschluss des taktilen¹ Sinneskanals. Die Darstellungsform des Naturbilds bietet die Möglichkeit, die Aufmerksamkeit der Rezipienten auf bestimmte Merkmale zu fokussieren, stellt dabei jedoch durch die Dimensionsreduktion „erhöhte Anforderungen an die Abstraktionsfähigkeit des Lernenden“ (Killermann et al., 2011, S. 170).

¹ im Sinne der haptischen Erfahrbarkeit des abgebildeten Realobjekts; Naturbilder können zwar in der Hand gehalten werden, jedoch basiert die Wahrnehmung des abgebildeten Realobjekts rein visuell und nicht auf taktilen Erfahrungen.

Als weitere Darstellungsform stellen *physische Modelle* (im Gegensatz zu Gedankenmodellen) die nächste Stufe der Abstraktion dar. Modelle stimmen zwar in relevanten Eigenschaften mit dem Realobjekt überein, jedoch wird durch die Reduktion oder Hervorhebung einzelner Eigenschaften eine höhere Anschaulichkeit erreicht (Killermann et al., 2011, S. 39). Infolgedessen unterscheiden sich Modelle in mindestens einer der folgenden Eigenschaften von Realobjekten: stofflicher Beschaffenheit, Dimension und inhaltlicher Abstraktion (z. B. Killermann et al., 2011, S. 39; Spörhase-Eichmann, 2015, S. 163). Eine weit anerkannte Einteilung materieller Modelle in Struktur- und Funktionsmodelle für den Biologieunterricht geht auf Halbach (1977) zurück. Demnach stellen Strukturmodelle die morphologischen und anatomischen Sachverhalte des Realobjekts in anschaulicher Weise dar (bspw. Herzmodell, Augenmodell). Funktionsmodelle hingegen unterscheiden sich i. d. R. optisch von Realobjekten und fokussieren sich auf die Darstellung von Vorgängen, die teilweise auch manipulativ nachvollzogen werden können (bspw. Funktionsweise von Spaltöffnungen oder Herzklappen).

Während Naturbilder Realobjekte, durch Kameraaufnahmen, zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort unverändert wiedergeben, entsprechen *Skizzen* in großen Teilen dem Original, jedoch in vereinfachter Form. Der Grad der Vereinfachung wirkt sich direkt auf die Abstraktion und die Detailtiefe aus. Eine weiter abstrahierte Darstellungsform, in der die Wirklichkeitstreue weiter in den Hintergrund gestellt wird, sind *Schemata*. Beim Schema liegt der Fokus auf den charakteristischen und allgemeinen Eigenschaften eines Realobjekts oder eines Vorgangs (Killermann et al., 2011). Durch die Reduktion der Komplexität realer Merkmale kann ein Schema schnell erfasst werden, setzt aber gleichzeitig eine hohe Abstraktionsfähigkeit der Lernenden voraus. Mithilfe von Schemata können Baupläne (z. B. ein Blütendiagramm) oder auch Vorgänge wie Entwicklungszyklen dargestellt werden.

Diagramme sind grafische Darstellungsformen, meist quantifizierbarer Eigenschaften, von Realobjekten oder Vorgängen. Entsprechend sind sie stark abstrahiert und fokussieren meist nur einzelne oder wenige Eigenschaften. Mithilfe von Diagrammen können komplexe Vorgänge stark vereinfacht auf das Wesentliche konzentriert und vergleichbar dargestellt werden. Häufig verwendete Arten von Diagrammen sind Säulen-, Balken-, Kurven-, Punkt- und Tortendiagramme. Bei *Texten* wird hingegen auf jegliche grafische Darstellung verzichtet und Realobjekte sowie biologische Vorgänge werden, meist unter Verwendung definierter Fachbegriffe, beschrieben. Textliche Beschreibungen greifen auf das Vorwissen und dadurch auf vorhandene kognitive Schemata (vgl. Kapitel 2.3) zurück und vermitteln dadurch einen Eindruck der Realität aus einer bestimmten Perspektive. Sie können mündlich (als Rede) oder verschriftlicht dargeboten werden. Texte basieren auf einer sinnhaften Aneinanderreihung von Wörtern, die wiederum aus einer bestimmten Abfolge von *Symbolen* in Form von Schriftzeichen (Alphabet) bestehen. Neben Schriftzeichen sind Symbole auch grafische

Bedeutungsträger von Realobjekten, Vorgängen und Begriffen. Darüber hinaus finden Symbole Anwendung in der Darstellung von Formeln (bspw. Photosynthesegleichung: $6 \text{ H}_2\text{O} + 6 \text{ CO}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$). Im Kontext der Biologie können somit auch Abkürzungen wie *ATP* (Adenosintriphosphat), Formelzeichen wie O (zur Beschreibung einer einjährigen Pflanze in Müller et al., 2016, S. 8) oder stark vereinfachte Piktogramme Verwendung finden.

Selten treten die zuvor beschriebenen Darstellungsformen isoliert auf, sondern meist in Kombination miteinander. Das Schulbuch mit der Kombination aus Text, Naturbildern, Schemata, Diagrammen und Symbolen ist ein Beispiel im Kontext von Unterrichtsmedien. Diese Art der Medien werden nach Spörhase-Eichmann (2015, S. 158) entsprechend als „Medien mit kombinierter Darstellungsform“ bezeichnet – mit der Einschränkung auf Darstellungsformen innerhalb der abgebildeten Realität. An dieser Stelle zeigt sich abermals, dass der Medienbegriff weit gefasst und nicht auf eine einzelne Darstellungsform beschränkt sein kann, sodass auch Medien mit kombinierter Darstellungsform als Medium bezeichnet werden (Schulbuch, Schülerheft, Lexikon, Website etc.). In diesem Zusammenhang stellt AR ebenfalls ein Medium mit kombinierter Darstellungsform dar. Entsprechend des wörtlichen Begriffs *Augmented Reality* (erweiterte Realität) und den in Kapitel 2.1 dargelegten Charakteristika ist die Beschränkung auf Darstellungsformen der abgebildeten Realität nichtig, da auch Realobjekte mit weiteren Informationen, bspw. Beschriftung, versehen werden können. Dass diese Beschränkung auch in einer klassischen Medienbetrachtung ohne AR kritisch zu hinterfragen ist, zeigt sich am Beispiel eines für den Biologieunterricht typischen Mediums: des Herbariums. Dieses kann ähnlich wie ein Schulbuch oder ein Arbeitsheft als eigenes Medium angesehen werden und verbindet in einer einfachen Art die Präparate (getrocknete Pflanzenteile) mit zugehörigen Textinformationen.

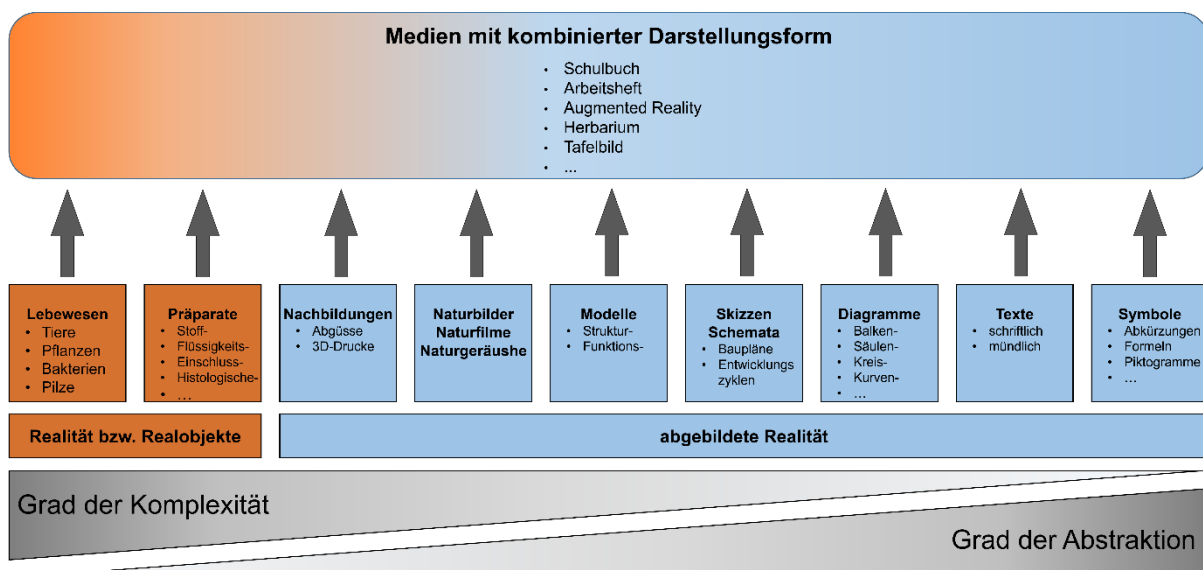


Abb. 3: Realobjekte und Darstellungsformen nach Abstraktionsgrad (veränderte Darstellung nach Spörhase-Eichmann, 2015, S. 158).

2.3 Cognitive-Load-Theorie

Die CLT ist ein theoretisches psychologisches Framework der empirischen Sozialforschung zur Beschreibung von Zusammenhängen zwischen Instruktion und Lernen (Korbach et al., 2018). Damit ist sie per se aber keine Lerntheorie, sondern ein theoretisches Instrument zur Verknüpfung von menschlicher kognitiver Architektur, Instruktionsdesign und Lernen (Moreno & Park, 2010, S. 20). Die Theorie wurde in den späten 1980er Jahren von John Sweller (1988, 1989) begründet und auf Grundlage zahlreicher empirischer Studien in den vergangenen Jahrzehnten erweitert sowie konkretisiert. Eine detaillierte geschichtliche Beschreibung der Entwicklung der CLT findet sich in Moreno und Park (2010). Die CLT ist von kognitivistischen Ansätzen geprägt, indem der Fokus auf den nicht direkt beobachtbaren Phänomenen (den auf Individuen einwirkenden CL in unterschiedlichen Instruktionsszenarien) liegt und ihre Annahmen in der menschlichen kognitiven Architektur begründet sind.

Der CL ist als die kognitive Belastung zu sehen, die eine bestimmte Aufgabe im Hinblick auf die erforderlichen geistigen Ressourcen mit sich bringt. Hinsichtlich der menschlichen kognitiven Architektur wird die Annahme getroffen, dass das Ziel einer Instruktion die Erweiterung der kognitiven Schemata im Langzeitgedächtnis ist, wozu neue Informationen einer Prozessierung im Arbeitsgedächtnis erforderlich sind. Im Gegensatz zum Langzeitgedächtnis ist das Arbeitsgedächtnis bei der Verarbeitung neuer Informationen hinsichtlich der Kapazität und der Dauer beschränkt (Miller, 1956; Peterson & Peterson, 1959). Ein kognitives Schema wird laut VandenBos (2015, S. 937) als eine Sammlung von Grundwissen über ein Konzept oder eine Entität definiert, das als Leitfaden für die Wahrnehmung, Interpretation, Vorstellungskraft oder Problemlösung dient. Der CL wirkt daher auf das Arbeitsgedächtnis und hat wesentlichen Einfluss darauf, ob neue Informationen in die bestehenden kognitiven Schemata des Langzeitgedächtnisses integriert werden können. Er kann in drei Loads differenziert werden: den Intrinsic Cognitive Load (ICL), den Extraneous Cognitive Load (ECL) und den Germane Cognitive Load (GCL).

2.3.1 Intrinsic Cognitive Load

Der *ICL* ist von zwei Faktoren abhängig: zum einen von der Komplexität des Lerngegenstands und zum anderen vom Vorwissen der Lernenden (Moreno & Park, 2010). Die Komplexität des Lerngegenstands wird durch die Elementinteraktivität bestimmt, die sich auf die Anzahl gleichzeitig zu verarbeitender Elemente im Arbeitsgedächtnis im Hinblick auf Lernen bezieht (Sweller, 1994, 2010a). Aufgaben mit hoher Elementinteraktivität bewirken einen hohen ICL und vice versa. Ein Beispiel für Elementinteraktivität kann durch das Lernen einer Fremdsprache beschrieben werden: So herrscht bspw. beim Vokabellernen eine niedrige Elementinteraktivität vor. Auch wenn eine große Anzahl an Vokabeln gelernt werden soll,

stehen die einzelnen Vokabeln für sich und können nacheinander im Arbeitsgedächtnis prozessiert und ins Langzeitgedächtnis überführt werden. Beim Formulieren ganzer Sätze in einer Fremdsprache tritt hingegen eine hohe Elementinteraktivität auf, da hier grammatikalische Regeln (z. B. Kasus, Tempus, Numerus, Genus) und Wortschatz simultan miteinander verknüpft werden müssen. Das Vorwissen ist durch die individuell verfügbaren Schemata der Lernenden bestimmt, die zur Bewältigung der Aufgabe herangezogen werden können.

Sweller (2010a, S. 38) versteht die Verbindung zwischen Arbeitsgedächtnis und Langzeitgedächtnis nicht als Einbahnstraße, sondern postuliert in *Environment organising and linking principle*, dass große Mengen organisierter Informationen aus dem Langzeitgedächtnis vom Arbeitsgedächtnis genutzt werden können, um Interaktionen mit der Außenwelt zu bestimmen, sodass bestehende kognitive Schemata zur Aufgabenlösung herangezogen werden und durch die neuen Informationen erweitert werden. Demnach ist der ICL für Lernende mit einem größeren Konzeptverständnis geringer als bei Lernenden, die nicht auf diese Ressourcen im Langzeitgedächtnis zurückgreifen können. Die Elementinteraktivität ist bei Lernenden, die die Fremdsprache auf höherem Niveau beherrschen, geringer als bei Neulingen, da auf bereits bekannte Schemata zurückgegriffen werden kann (Automatisierung), wodurch das Arbeitsgedächtnis entlastet wird.

Aufgrund des individuellen Charakters der Elementinteraktivität ist es nicht möglich, diese durch einfache Analyse des Lerngegenstands zu bestimmen (Sweller, 2010a). Der ICL kann daher im schulischen Kontext nur proaktiv von der Lehrkraft durch die Vermittlung von nötigem Vorwissen verändert werden. Eine quantitative didaktische Reduktion der Aufgabe, mit der der Sachverhalt durch Vernachlässigung irrelevanter Aspekte zu reduzieren versucht wird (Grüner, 1967), führt bspw. dazu, dass sich der Lerngegenstand selbst ändert. Der daraus resultierende ICL ist nicht mehr mit dem ICL des ursprünglichen Sachverhalts vergleichbar.

2.3.2 Extraneous Cognitive Load

Der *ECL* wird durch Elemente des Instruktionsdesigns hervorgerufen, die das Lernen behindern (Korbach et al., 2018). Somit basiert der *ECL* ebenfalls auf dem Konzept der Elementinteraktivität (Sweller, 1994, 2010a; Sweller et al., 1998), jedoch mit dem Unterschied, dass durch Änderung des Instruktionsdesigns auf diesen Einfluss genommen werden kann. Demnach führt ein unzureichendes Instruktionsdesign mit hoher Elementinteraktivität zu einem hohen *ECL*. Das primäre Ziel der *CLT* ist es daher, Effekte zu beschreiben, die zu einer Reduktion des *ECL* beitragen, um das Arbeitsgedächtnis zu entlasten. Während ein hoher *ICL* erwünscht sein kann (sofern die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses nicht voll ausgeschöpft

wird), gilt es, den ECL durch die Gestaltung der Lehr-Lern-Materialien und der Aufgabenstellung zu reduzieren (Sweller, 2011).

Beispiele zur Einflussnahme auf den ECL durch Anpassung der Lehr-Lern-Materialien können die Positionierung und Verweise auf relevante Informationen sein. Beim Lesen eines fremdsprachigen Textes mit dem Ziel, neue Vokabeln kontextgebunden zu lernen, können unbekannte Vokabeln bspw. im Anhang aufgeführt sein, sodass die Lernenden ihre Aufmerksamkeit, bedingt durch das Umblättern, vom Text abwenden, was wiederum zu einem höheren ECL führt. Wird die Übersetzung neuer Vokabeln hingegen am Textrand positioniert, kann der ECL gesenkt werden, da die Aufmerksamkeit nicht geteilt wird (vgl. Split-Attention-Effekt, Tab. 1). Eine Übersicht über weitere ausgewählte Effekte findet sich in Tab. 1. In Bezug auf den bildungstheoretischen Kontext von Grüner (1967) kann also eine qualitative (horizontale) didaktische Reduktion, bei der die Informationen durch die mediale Darstellung den Lernenden besser zugänglich gemacht werden sollen, zu einer Reduzierung des ECL beitragen.

2.3.3 Germane Cognitive Load

Der *GCL* wurde ursprünglich als dritte Kategorie der *CLT* eingeführt (Sweller et al., 1998). Er wurde als die kognitive Belastung im Sinne verfügbarer Arbeitsgedächtnisressourcen definiert, die zur Verarbeitung der Lerninhalte (Schema-Akquise) und damit zum Umgang mit dem *ICL* notwendig sind. Je mehr dieser verfügbaren Ressourcen also für den Umgang mit dem *ECL* aufgewendet werden müssen, desto weniger stehen für den *ICL* zur Verfügung. Geeignete Instruktionsdesigns verringern demnach den *ECL*, bei gleichzeitiger Erhöhung des *GCL*, sodass der gesamte *CL* gleich bleibt. Die Substitution des *ECL* durch den *GCL* konnte jedoch in zahlreichen Studien nicht bestätigt werden (u. a. Seufert und Brünken (2006), Seufert et al. (2007), Klepsch und Seufert (2020)), da eine Reduzierung des *ECL* den gesamten *CL* senkt. Daraufhin wurde die *CLT* einer Neukonzeption (Kalyuga, 2011; Sweller, 2011; Sweller et al., 2011a) unterzogen, in der davon ausgegangen wird, dass der *GCL* nicht zum Gesamt-*CL* beiträgt, also selbst keine kognitive Belastung des Arbeitsgedächtnisses darstellt, sondern die Ressourcen von lernhinderlichen Aktivitäten auf Ressourcen umverteilt, die für das Lernen relevant sind (Sweller et al., 2019). Sweller (2010b) führte dies weiter aus und definierte den *GCL* als diejenigen Ressourcen, die dem Umgang mit dem *ICL* gewidmet sind und schlug eine Umbenennung des *GCL* in *Germane Resources (GR)* vor, die zur Verarbeitung des *ICL* genutzt werden. Parallel dazu muss es ähnliche Arbeitsgedächtniskapazitäten geben, um den *ECL* zu verarbeiten (*Extraneous Resources, ER*) (Sweller, 2010b). Leppink et al. (2014) übernahmen in ihrer Validierung des zuvor entwickelten Messinstruments (Leppink et al., 2013) die von Kalyuga (2011), (Sweller et al., 2011a) und Sweller (2011) vorgeschlagene Revision, behielten jedoch die ursprüngliche Nomenklatur bei, um Verwirrungen zu vermeiden.

Der GCL wird demnach als ein Indikator für den Lernprozess aufgefasst, sodass ein hoher GCL mit einer hohen Lernleistung assoziiert sein kann.

2.3.4 Verhältnis der Cognitive Loads und Cognitive-Load-Effekte

Der ICL und der ECL verhalten sich additiv zueinander, sodass durch eine Überschreitung der Arbeitsgedächtniskapazität (Summe beider Loads) das Lernen behindert oder gar eingestellt wird (Sweller, 2010a). Die Integration neuer Informationen in vorhandene Schemata des Langzeitgedächtnisses ist nicht mehr möglich. Eine Reduzierung des ECL erlaubt es zwar, dass potenziell mehr Ressourcen für lernrelevante Aufgaben zur Verfügung stehen, allerdings müssen diese freien Ressourcen auch für den Lernprozess von den Lernenden genutzt werden. Dies tritt in Lernszenarien mit einem hohen ICL auf, die viele Ressourcen zum Lernen benötigen. Ist der ICL hingegen niedrig, führt eine Reduktion des ECL nicht zwingend zu besseren Lerneffekten, da auch ohne Veränderung des ECL genügend Ressourcen zur Schemakonstruktion zur Verfügung stehen (vgl. Element-Interactivity-Effekt, Tab. 1). Das Vorwissen der Lernenden nimmt nicht nur direkten Einfluss auf den ICL, sondern kann sich auch auf den ECL auswirken. Informationen, die für unerfahrene Lernende zur Ermöglichung des Lernprozesses hilfreich sind (GCL), können erfahrene Lernende von der eigentlichen Lernaufgabe ablenken und in einem höheren ECL resultieren (vgl. Expertise-Reversal-Effekt, Tab. 1).

Tab. 1: Cognitive-Load-Effekte mit Auswirkung auf unterschiedliche Loads (Auswahl). (veränderte Darstellung nach Sweller et al., 2019, S. 267).

Effekt	Veröffentlicht in	Beschreibung	Load
Worked Example	Sweller und Cooper (1985)	Lernern bereits gelöster Beispiele führt zu besserer Leistung in nachfolgenden Aufgaben	ECL, GCL
Completion	van Merriënboer und Krammer (1987)	Herkömmliche Aufgaben durch Aufgaben mit Teillösung zur Vervollständigung ersetzen	ECL
Split-Attention	Tarmizi und Sweller (1988)	Mehrere Informationsquellen, die entweder räumlich oder zeitlich voneinander getrennt sind, zu einer Informationsquelle zusammenführen	ECL

Fortsetzung Tab. 1

Modality	Mousavi et al. (1995)	Kombination aus zweifacher visueller Information (unimodal, Text und Bild) durch multimodale Kombination (Sprache und Bild) ersetzen	ECL
Redundancy	Chandler und Sweller (1991)	Ersatz mehrerer in sich geschlossener Informationsquellen durch eine einzelne Informationsquelle	ECL
Expertise-Reversal	Kalyuga et al. (2003; 2012)	Beobachtete CL-Effekte bei unerfahrenen Lernenden finden sich nicht bei erfahrenen Lernenden oder sind umgekehrt	ECL
Element-Interactivity	Sweller (1994)	CL-Effekte, die sich bei Aufgaben mit hoher Elementinteraktivität zeigen, lassen sich nicht bei Aufgaben mit niedriger Elementinteraktivität nachweisen	ICL, ECL
Collective Working-Memory	Kirschner et al. (2009)	Individuelle Lernaufgaben durch kollaborative Lernaufgaben ersetzen, sodass mehr kognitive Ressourcen zur Verfügung stehen	ICL, ECL

2.4 Benutzungsschnittstellen der Mensch-Computer-Interaktion

In der Wissenschaftsdomäne der Mensch-Computer-Interaktion stellt die Erforschung von Benutzungsschnittstellen ein relevantes Forschungsfeld dar. In diesem Kapitel wird daher ein Überblick über die zum Verständnis notwendige Terminologie gegeben, die einzelnen Begriffe werden miteinander in Kontext gesetzt, ausgewählte Arten von Benutzungsschnittstellen werden beschrieben und einzelne Regeln, die bei der Gestaltung einer Benutzungsschnittstelle beachtet werden sollten, werden erläutert.

Die Benutzungsschnittstelle wird nach EN ISO 9241-110 (2020-10-00, S. 10) als die „Gesamtheit der Bestandteile eines interaktiven Systems, die Informationen und Steuerelemente zur Verfügung stellen, die für den Benutzer notwendig sind, um eine bestimmte Aufgabe mit dem interaktiven System zu erledigen“, definiert. Ein analoges Beispiel zur Verdeutlichung wäre der Lichtschalter, der das UI zum Ein- und Ausschalten einer Lampe darstellt.

Hiervon abzugrenzen ist der Begriff der UX, der als die „Kombination von Wahrnehmungen und Reaktionen einer Person, die aus der tatsächlichen und/oder der erwarteten Benutzung eines Systems, eines Produkts oder einer Dienstleistung resultieren“ (DIN, 2018-11-00, S. 12), definiert wird. Aus diesen Definitionen abgeleitet nimmt die objektive Ausgestaltung des UI wesentlichen Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung der UX, da die Nutzenden zum Ausführen und Vervollständigen einer Aufgabe über die UI mit dem System interagieren müssen. Darauf aufbauend benennt und beschreibt die EN ISO 9241-110 sieben Interaktionsprinzipien und Gestaltungsempfehlungen (vgl. Kapitel 2.4), die für die Umsetzung einer UX relevant sind.

Mit der fortschreitenden technischen Entwicklung entstehen auch neue Möglichkeiten der UI-Gestaltung. Die Anfänge der Mensch-Computer-Interaktion gehen auf die 1960er Jahre zurück, in denen die erste Form der UI, die Command-Line-Interfaces (CLI), entwickelt wurden. Die CLIs zeichnen sich dadurch aus, dass Befehle durch Texteingabe oder Skripte innerhalb einer Konsole ausgeführt sowie vom System verarbeitet werden und dem Befehl entsprechende Informationen vom Computer in der Konsole dargestellt werden (W. Liu, 2010). Die Nutzung eines CLI erfordert neben einer Tastatur zur Befehlseingabe Wissen über die dem System zugrunde liegende Syntax. Das CLI wurde in den darauffolgenden Jahrzehnten infolge des technischen Fortschritts und der Entwicklung durch das GUI zurückgedrängt.

Ein GUI ermöglicht Benutzungsinteraktionen, meist unter Nutzung einer Computermaus als Eingabegerät, mit grafischen Symbolen und Steuerelementen. Das am weitesten verbreitete Grundkonzept für den Aufbau eines GUI stellt WIMP (Windows, Icons, Menus, Pointer) (W. Liu, 2010) dar. Es bildet die Grundlage moderner grafischer Betriebssysteme wie Windows

oder MacOS. An dieser Stelle ist anzumerken, dass Betriebssysteme wie MacOS oder Windows neben einem GUI auch über ein CLI verfügen. Seit Mitte der 2000er Jahre entwickelte sich eine neue Art des UI heraus, bei der der Fokus auf die natürliche Bedienbarkeit durch die Nutzenden gelegt wird, sodass keine technischen Fähigkeiten erworben werden müssen, um mit dem UI zu interagieren (Maïke et al., 2015, S. 92). Diese intuitive Form des UI wird daher gemeinhin als *Natural User-Interface* (NUI) bezeichnet und ist die Grundlage auf Berührung basierender Endgeräte. Zwar beinhalten NUIs wie auch GUIs grafische Bedienelemente, der grundlegende Unterschied besteht jedoch in der Bedienung, die ohne weitere externe Eingabegeräte auskommt. Des Weiteren ist der theoretische Rahmen eines NUI weit gefasst (Fu et al., 2018), sodass alle Benutzungsschnittstellen, die eine natürliche Bedienung erlauben, als NUI aufgefasst werden können (bspw. Sprachassistenten wie Amazon Alexa oder Apple Siri).

Dementsprechend konkretisieren García-Peñalvo und Moreno (2019, S. 1) den NUI-Begriff insofern, als die Nutzenden interaktive Systeme durch Aktionen des menschlichen Körpers bedienen, bspw. Gesten, Berührung, Haptik oder Sprache. Gemäß dieser Definition fällt im Kontext von (Marker-based) AR die Steuerung durch Bewegen der Trigger ebenfalls unter das NUI-Konzept. Ein vergleichbares UI, bei dem der Fokus jedoch explizit auf haptischer (greifbarer) Steuerung liegt, ist das auf die Arbeit von Ishii und Ullmer (1997) zurückgehende Konzept des *Tangible User-Interface* (TUI). Nach Hornecker (2005, S. 28) ist ein TUI charakterisiert durch:

1. **Tangible Manipulation:** Ein reales (greifbares) Objekt kann durch menschliche Interaktion manipuliert werden, bspw. Drehung und Bewegung des Objekts.
2. **Spatial Interaction:** Die greifbare Interaktion findet im realen Raum statt.
3. **Embodied Facilitation:** Die greifbare Interaktion führt zu einem Äquivalent im digitalen Raum.
4. **Expressive Representation:** Im Zentrum steht die „physische Darstellung von Daten“ (Hornecker, 2005, S. 25), die eine hybride Repräsentation von greifbaren und virtuellen Elementen ermöglicht. Ein Beispiel für eine TUI stellt das Musikinstrument *Reactable* (vgl. Abb. 4) dar. Hierbei führt eine Interaktion mit den greifbaren Elementen zu einer Änderung der virtuellen Informationen (z. B. Lautstärke, Höhen und Tiefen) und zu einer Änderung der haptischen Elemente selbst (z. B. Farbänderung).



Abb. 4: Beispiele für Tangible User-Interfaces. Das Musikinstrument *Reactable* (links) (Williams, 2007) und *SandScape* zur dynamischen Visualisierung von Höhenprofilen (rechts) (Osipov, 2017).

Demnach erfüllt die Marker-based AR zwar die ersten drei Kriterien eines TUI, da sich durch das Bewegen des Triggers (1) im Realraum (2) auch die virtuelle Information ändert (3), jedoch findet keine hybride Darstellung (4) statt, da die virtuellen Informationen auf einem Display repräsentiert werden und nicht auf den greifbaren Triggern selbst. Nach Ullmer und Ishii (2000, S. 917) unterscheiden sich TUIs von klassischen Eingabegeräten (bspw. Tastatur und Maus) dadurch, dass die Schnittstelle eng an die Identität und physische Konfiguration bestimmter physisch repräsentativer Artefakte gekoppelt ist.

Wie eingangs erwähnt kann das UI wesentlich die UX beeinflussen, weshalb sich gerade im Kontext des Designs von NUIs der Entwicklungsansatz des *User-centered Designs* etabliert hat. Dieser wird in der DIN EN ISO 9241-210 „Menschenzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme“ definiert als

Herangehensweise bei der Gestaltung und Entwicklung von Systemen, die darauf abzielt, interaktive Systeme gebrauchstauglicher zu machen, indem sie sich auf die Verwendung des Systems konzentriert und Kenntnisse und Techniken aus den Bereichen der Arbeitswissenschaft/Ergonomie und der Gebrauchstauglichkeit anwendet (DIN, 2020-03-00, S. 9).

Sie rückt damit den Mittelpunkt des Entwicklungsprozesses auf die Bedürfnisse der Nutzenden, sodass das System diesen Bedürfnissen angepasst wird – und nicht umgekehrt (Anpassung der Nutzenden an das System). Zur praktischen Gestaltung des UI gemäß dem User-centered Design beschreibt Nacheva (2015, S. 147) konkrete Gestaltungsprinzipien, wobei er die allgemeinen Prinzipien der UI-Gestaltung von Norman (2013), Shneiderman et al. (2016), Nielsen (2010) und Tognazzini (2014) berücksichtigt (Auswahl). Die konkrete Umsetzung der UI-Gestaltung der einzelnen Apps wird in Kapitel 5.2 erläutert.

Appearance:

1. *Sensory comfort*: Bezieht sich auf die menschliche Sinneswahrnehmung (visuell, auditiv, haptisch), die in ansprechender Weise berücksichtigt werden muss. Entscheidende Faktoren für visuellen Komfort sind bspw. die Kombination von bestimmten Farben, Lesbarkeit von Schrift, Buttons und Labels sowie Farbunterscheidungen bei der Differenzierung von unterschiedlichen Funktionen.
2. *Minimalism*: Einfachheit als Credo der Gestaltung, da eine hohe Anzahl von Elementen zu Unbehagen und Frustration der Nutzenden führen kann (vgl. ECL)
3. *Intuitiveness*: Anwendung sollte so intuitiv wie möglich bedienbar sein, unter Berücksichtigung der Anforderungen, die an das System gestellt werden.
4. *Aesthetics*: Ein minimalistisches Design ist nicht gleichbedeutend mit Ästhetik. Diese wird erst durch die Wahl der Farben, der Schriften und der grafischen Elemente erreicht. Eine ästhetische Gestaltung ist eine Grundvoraussetzung zur Erreichung von Zufriedenheit bei den Nutzenden.
5. *Structuring Interface-Objects*: Die korrekte Anordnung von Steuerelementen auf dem Interface ergibt sich aus Fitts' Gesetz, das die Distanz zum Ziel sowie die Größe als Parameter für die Dauer menschlicher Bewegungen bei Zeigeaufgaben voraussagt.

Consistency:

6. *Standardization*: Berücksichtigung formeller (bspw. ISO) und informeller Normen
7. *Mental Models of Users*: Je mehr das Design mit den vorherigen Vorstellungen der Nutzenden übereinstimmt, desto einfacher ist die Orientierung.

Efficency:

8. *Ease of work*: Schnelle Zielerreichung der Nutzenden mit dem System
9. *Sense of Freedom*: Den Nutzenden Freiräume ermöglichen, sodass das System an temporäre Bedürfnisse angepasst werden kann
10. *Implement Cognitive Resources*: Den Umfang zu investierender kognitiver Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses zur Aufgabenbewältigung so niedrig wie möglich halten (vgl. ECL)

2.5 Benutzungsfreundlichkeit und Nutzungserlebnis

Häufig werden die Begriffe *Usability* (Benutzungsfreundlichkeit) und *User-Experience* (Nutzungserlebnis, UX) synonym verwendet. Dies ist jedoch bei genauerer Betrachtung nicht zielführend und es bedarf zur Begriffsschärfung einer Abgrenzung. Die Benutzungsfreundlichkeit wird in der Norm 9241-11 nach DIN EN ISO definiert als „das Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ (DIN, 2018-11-00, S. 6). Während die Effektivität beschreibt, ob die Ziele mithilfe des Produkts voll erreichbar sind, geht es bei der Effizienz um die Frage, wie hoch der Aufwand mithilfe des Produkts zur Zielerreichung ist. Die Zufriedenheit stellt ein subjektives Urteil der Nutzenden mit dem Produkt dar. Ebenfalls ist per definitionem festgehalten, dass die Benutzungsfreundlichkeit immer im Rahmen der Zielgruppe und des Benutzungskontextes gesehen werden muss.

Als analoges Beispiel zur Verdeutlichung des Benutzungskontextes können Schlittschuhe betrachtet werden. Diese sind gut zur Fortbewegung auf Eis geeignet, weisen aber auf Asphalt deutliche Defizite auf. Ein Beispiel für die Zielgruppe, das sich näher an dieser Arbeit orientiert, stellen AR-Entwicklerumgebungen dar (z. B. Unity3D mit ARKit/ARCore). Diese richten sich an professionelle Softwareentwickelnde und können für die durchschnittliche Lehrkraft eine Herausforderung darstellen. Die Definition macht jedoch keine weiteren konkreten Angaben darüber, wie Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit bei einem Produkt erreicht werden können, und ist somit nur bedingt praxistauglich. Hierzu existiert eine weiterführende Beschreibung in der EN ISO 9241-110 (DIN, 2020-10-00, S. 11), die für interaktive Systeme sieben Qualitätskriterien festlegt, die im Folgenden anhand ausgewählter Beispiele für App-Anwendungen kurz beschrieben werden:

Aufgabenangemessenheit: Ist die App zur Lösung einer vorgegebenen Aufgabe geeignet? Entlastet die App die Nutzenden? Bildet die App alle für die Lösung der Aufgabe relevanten Informationen ab? Beinhaltet die App unnötige Informationen, die Nutzende ablenken und/oder an der Lösung der Aufgabe hindern (vgl. ECL)?

Selbstbeschreibungsfähigkeit: Haben die Nutzenden Zugriff auf Informationen zur Bedienung der App? Gibt die App Rückmeldung über Wartezeiten oder den aktuellen Zustand der App (z. B. Häkchen bei aktivierten Toggles)? Ist die Menüstruktur ersichtlich, sodass eine einfache Navigation möglich ist?

Erwartungskonformität: Reagiert die App wie erwartet auf Benutzungseingaben? Sind Schaltflächen als solche erkennbar? Knüpft die Bedienung an Vorerfahrungen der Zielgruppe an (vgl. ECL bzw. ICL, wenn die Aufgabe darin besteht, den Umgang mit der

App zu lernen)? Ist die Struktur und Funktion der App konsistent bzw. sind ähnliche Informationen und Funktionen innerhalb der App ähnlich dargestellt? Hält sich die Bedienbarkeit der App an gängige Konventionen?

Erlernbarkeit: Existiert eine Anleitung zur Bedienung der App? Ist die Bedienung der App leicht zu lernen? Folgen Bedienschritte einem transparenten, verständlichen Prinzip?

Steuerbarkeit: Haben die Nutzenden die Kontrolle über die App oder umgekehrt? Lassen sich Bedienschritte rückgängig machen? Ist die Abfolge der Informationen vorgegeben oder beeinflussbar?

Robustheit gegen Benutzungsfehler: Stürzt die App unerwartet ab? Gibt die App Rückmeldung zu Fehleingaben? Gibt die App Hinweise bei Fehleingaben der Nutzenden? Lassen sich Fehleingaben rückgängig machen oder beheben?

Benutzerbindung: Stellt die App Informationen und Funktionen so dar, dass die für sie Nutzenden einladend und motivierend sind? Fördert die App eine kontinuierliche Interaktion?

Die Qualitätskriterien geben also Aufschluss über die Struktur und Funktion von Anwendungen, sodass eine möglichst gute Benutzungsfreundlichkeit erzielt wird. Das Konzept der UX ist im Gegensatz zur Benutzungsfreundlichkeit deutlich vielschichtiger, da es sich nicht primär am Produkt orientiert, sondern an der Beziehung der Nutzenden zum Produkt. Die EN ISO 9241-210 beschreibt UX als:

Wahrnehmungen und Reaktionen einer Person, die aus der tatsächlichen und/oder der erwarteten Benutzung eines Produkts, eines Systems oder einer Dienstleistung resultieren. Dies umfasst alle Emotionen, Vorstellungen, Vorlieben, Wahrnehmungen, physiologischen und psychologischen Reaktionen, Verhaltensweisen und Leistungen, die sich vor, während und nach der Nutzung ergeben (DIN, 2020-03-00, S. 11).

Die Benutzungsfreundlichkeit ist demnach ein Teilbereich der UX, die sich wie in Abb. 5 gezeigt darstellen lässt.

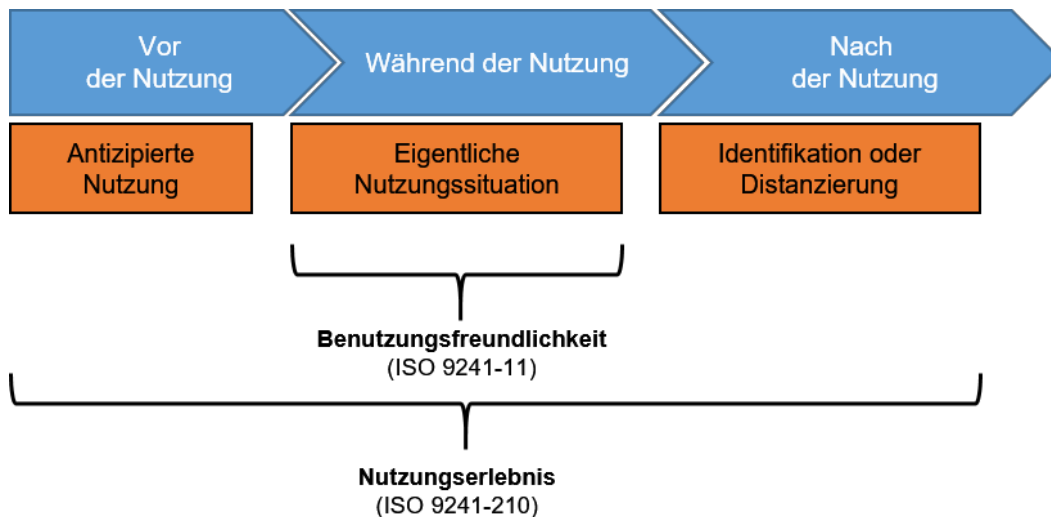


Abb. 5: Normen der Benutzerfreundlichkeit und der User-Experience (veränderte Darstellung Geis, 2010).

Die Definition der UX nach ISO 9241-210 gibt zwar wieder, was gemeinhin als Nutzungserlebnis verstanden werden kann und wie es in Bezug zur Benutzungsfreundlichkeit zu sehen ist, jedoch fehlen klare Kriterien, die die UX erfassbar machen. Hassenzahl (2001) schlägt hierzu ein Modell vor, das die bekannten Qualitätskriterien der Benutzungsfreundlichkeit aufgreift und unter pragmatischen Qualitätskriterien zusammenfasst. Weitere, nicht offensichtlich der Lösung einer Aufgabe zuträgliche Kriterien (bspw. Originalität oder Innovationskraft), fasst er unter hedonischen Qualitätskriterien zusammen. Schrepp (2018b) greift die Kategorisierung pragmatischer und hedonischer Qualitätskriterien auf und formuliert auf Grundlage einer Vielzahl an existierenden Fragebögen zur Erfassung der UX Teilaspekte der beiden Qualitätskriterien. Die folgende Beschreibung pragmatischer und hedonischer Qualitätskriterien beschränkt sich auf Teilaspekte der UX, die mit dem *User-Experience-Questionnaire* (UEQ, Laugwitz et al., 2008; Schrepp et al., 2014) erfasst werden. Dazu gehören: Attraktivität, Durchschaubarkeit, Effizienz, Steuerbarkeit, Stimulation und Originalität.

Attraktivität spiegelt den Gesamteindruck des Produkts wieder und „beschreibt die allgemeine Zufriedenheit bzw. Unzufriedenheit“ (Schrepp, 2018b, S. 71). Da nur ein allgemeiner Eindruck im Sinne von gut/schlecht erfasst wird und kein klarer Bezug zur UX selbst, lässt sich die Attraktivität weder zu pragmatischen noch zu hedonischen Qualitätskriterien zuordnen (Schrepp, 2018b). Die Attraktivität wird häufig auch durch den Begriff *Valenz* beschrieben.

Durchschaubarkeit ist ein pragmatisches Qualitätskriterium und beschreibt die Erlernbarkeit und die Intuition im Umgang mit dem Produkt. Nach Schrepp (2018b) lässt sich die Durchschaubarkeit in weitere Teilaspekte aufgliedern: Die *intuitive Bedienung* geht der Frage nach, ob das Produkt ohne weitere Hilfsmittel von den Nutzenden bedient

werden kann, ohne dass es zu einer kognitiven Belastung kommt. Der Grad der intuitiven Bedienbarkeit hängt nicht nur vom Produkt selbst ab, sondern auch von den Vorerfahrungen der Nutzenden. Dieser Umstand führt dazu, dass häufig Konventionen zum Zweck der intuitiven Bedienung herstellerübergreifend beibehalten werden. Der Unterschied zwischen den Teilaspekten *intuitive Bedienung* und *selbsterklärend* liegt in der Nutzung von Hilfsmitteln sowie der kognitiven Belastung bei der Bedienung des Produkts. Ein Produkt ist demnach selbsterklärend, wenn die Nutzenden trotz falscher Bedienschritte und notwendiger Korrekturen in vertretbarer Zeit zum Ziel kommen und dadurch das System zu verstehen lernen.

Der Teilaspekt *schnelle und leichte Erlernbarkeit* greift die vorherigen Teilaspekte auf und spielt gerade bei komplexen Produkten eine tragende Rolle, bei denen *intuitive Bedienung* und *Selbsterklärung* durch gestalterische Elemente an ihre Grenzen kommen. Üblicherweise handelt es sich hierbei um Produkte in beruflichen oder professionellen Kontexten, die eine entsprechende Ausbildung und Dokumentation der Bedienung voraussetzen. Indessen sollte die kognitive Belastung beim Erlernen der Bedienung nicht unnötig hoch gehalten werden.

Der Teilaspekt *Konsistenz* wird berücksichtigt, wenn vergleichbare Funktionalitäten und Steuerelemente auch an ähnlicher Stelle verortet sind. Dies trägt gerade bei nicht intuitiver Bedienbarkeit dazu bei, dass der Umgang mit dem Produkt zeiteffektiv erlernt werden kann. Der letzte Teilaspekt, *Verfügbarkeit geeigneter Dokumentation*, ist gerade bei komplexen Produkten im professionellen Kontext ein relevanter Faktor und spielt daher in alltäglichen Produkten nur eine untergeordnete Rolle. Dementsprechend kann er auch nur in speziellen Fällen als relevant für die UX betrachtet werden.

Effizienz ist ein wesentliches pragmatisches Qualitätskriterium, das sich auch per definitionem in ISO 9241-11 (DIN, 2018-11-00, S. 6) wiederfindet und beschreibt, ob die Nutzenden ohne viel unnötigen Aufwand mithilfe des Produkts ihr gewünschtes Ziel erreichen können. Effizienz lässt sich in die beiden Teilaspekte *System-Antwortzeit* und *Effizientes Design* untergliedern. Die *System-Antwortzeit* hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab: der verfügbaren Rechenleistung des Systems und dem Umfang der zu berechnenden Aufgabe. Auch wenn die System-Antwortzeit objektiv erfassbar ist, ist das Empfinden der Dauer vom Nutzungskontext und von den Nutzenden selbst abhängig. Die Toleranzschwelle bei komplexen Rechenaufgaben (z. B. 3D-Rendering, Videoexport u. Ä.) liegt deutlich höher als bei einfachen Zustandswechseln (z. B. an-/ausschalten von Textbeschriftungen innerhalb einer App). Kommt es bei letzterem Szenario zu langen Wartezeiten, verschwimmt das Erkennen von Ursache und Wirkung und es kommt zu einer Unterbrechung des Flows (Nakamura & Csikszentmihalyi, 2009, S. 197).

Das *effiziente Design* greift teilweise indirekt in die System-Antwortzeit ein, indem es den Nutzenden den Rechenprozess durch Visualisierung zugänglich macht und über den aktuellen Zustand informiert, um so die Toleranzschwelle anzuheben. Als konkretes Beispiel kann hier das sich öffnende Dialogfeld beim Kopieren von Dateien angesehen werden, das neben der zu kopierenden Datenmenge die verbleibende Zeit sowie den aktuellen Fortschritt und die Transferrate mithilfe eines Ladebalkens angibt. Erst durch dieses Element wird den Nutzenden die Rechenoperation visualisiert und verständlich gemacht. Eine weitere relevante Funktion des effizienten Designs liegt in der Minimierung von Interaktionsschritten zur Zielerreichung.

Als letztes pragmatisches Qualitätskriterium wird mit dem UEQ die *Steuerbarkeit* erhoben. Dieses Kriterium erfasst die Kontrolle der Nutzenden über das Produkt und umgekehrt. Die Nutzenden sollten das Gefühl haben, das Produkt durch Interaktionen steuern zu können, wohingegen ein Kontrollverlust an das Produkt vermieden werden sollte. Das dieser Kontrollwunsch auch subjektiv ist und sich auch sukzessive wandelt, zeigt das von Schrepp (2018b, S. 54) eröffnete Beispiel des autonomen Fahrens. Hierbei ist ein komplexes System von Sensoren, Rechenoperationen und Steuerungsmechanismen erforderlich, das den Nutzenden größtenteils verborgen bleibt und das auch nur ein kleiner Teil der Menschen technisch nachvollziehen kann. Dieser Kontrollverlust führt zu Aversion und Skepsis der Nutzenden gegenüber dem Produkt. Vollzieht sich dieser Kontrollverlust hingegen schrittweise, sodass sich ein Gefühl der Kontrollübergabe einstellt, lassen sich diese anfänglichen Befürchtungen beseitigen und ins Gegenteil verkehren. Beim Beispiel des autonomen Fahrens sind es die weitgehend akzeptierten und positiv wahrgenommenen Assistenzsysteme, die diesen schrittweisen Transfer zum autonomen Fahren möglich machen werden. Trotz Eingriffen in das Fahrverhalten werden diese als Unterstützung wahrgenommen und nicht als Kontrollverlust. Die Steuerbarkeit lässt sich weiterhin in vier Teilaspekte untergliedern: das bereits angesprochene *Gefühl der Kontrolle* der Nutzenden über das Produkt als wesentliches Merkmal der Steuerbarkeit, die *Vorhersehbarkeit*, bei der das Produkt auf Nutzungseingaben wie erwartet reagiert, die Transparenz des Systemzustands, die den „Nutzer [...] immer über den aktuellen Zustand des Systems informiert“ (Schrepp, 2018b, S. 54), und die *Fehlervermeidung*, wobei das System dabei hilft, Fehler zu vermeiden bzw. zu korrigieren.

Die *Stimulation* gilt als hedonisches Qualitätskriterium, da sie keinen direkten Einfluss auf die Bearbeitung von Aufgaben mithilfe des Produkts hat. Vielmehr erfasst es, ob es Freude bereitet, mit dem Produkt zu arbeiten oder zu interagieren. Ein interessantes Produkt wirkt geistig anregend und motivierend. Dieses Qualitätskriterium findet sich häufig in der derzeitigen (digitalen) Bildungsdiskussion rund um Gamification wieder. Hierbei werden klassische Spielelemente (bspw. Punkte, Achievements, Level etc.) mit

Bildungsmedien verknüpft, um die Motivation im Umgang mit dem Bildungsinhalt zu steigern. Weitere Beispiele sind digitale Schrittzähler, die häufig in Smartphones oder Uhren integriert sind. Diese motivieren einerseits passiv durch die objektive Erfassung und Visualisierung der Schrittzahl und andererseits aktiv durch Verleihung von Abzeichen bei Erreichen einer bestimmten Schrittzahl.

Die *Originalität* ist ebenfalls ein hedonisches Qualitätskriterium und beschreibt, ob ein Produkt als neuartig und originell wahrgenommen wird. Innovative und kreative Produkte heben sich von anderen vergleichbaren Produkten ab und ziehen dadurch die Aufmerksamkeit der Nutzenden auf sich. Dies kann bspw. durch neuartige Funktionen oder besondere Designelemente erreicht werden. Diese Abhebung von anderen Produkten bricht in der Regel mit bekannten Konventionen, die aber gerade für die Durchschaubarkeit von Bedeutung sind. Infolgedessen kann ein Produkt in bestimmten Fällen zwar origineller wahrgenommen werden, aber die generelle Attraktivität kann darunter leiden. Das Brechen mit Konventionen sollte daher nicht als Mittel zum Zweck i. S. der Originalitätssteigerung erfolgen, sondern einen direkten Mehrwert für die Nutzenden bewirken und neue Maßstäbe setzen.

Die UX, als ein wesentlicher Teil der Mensch-Computer-Interaktion, und die CLT weisen bereits in ihrer ursprünglichen Entwicklung starke Zusammenhänge auf. Beide haben einen starken Fokus auf Reduktion irrelevanter kognitiver Belastung (Hollender et al., 2010). Ebenso zeigt der Vergleich beider Modelle, dass insbesondere der Split-Attention-Effekt bei der Softwareentwicklung berücksichtigt wird, sodass die Nutzenden nach Nielsen (1994) keine zum Bearbeiten einer Aufgabe notwendigen Informationen von einem Dialog zum anderen in Erinnerung behalten müssen.

Darüber hinaus sollten nach Chalmers (2003) Software-Elemente mit zusammenhängenden Informationen in räumlicher Nähe zueinander stehen. Gemeinhin zielen die Prinzipien der Benutzungsfreundlichkeit darauf ab, die UX möglichst intuitiv zu gestalten (Oviatt et al., 2006) und dadurch den ECL zu reduzieren und das Lernen zu verbessern (Sawicka et al., 2008). Dementsprechend beziehen beide Modelle das Vorwissen und die Vorerfahrung der Nutzenden mit ein. Nach Schrepp (2018b) hängt die intuitive Bedienbarkeit davon ab, wie sich die Softwarebedienung von bereits bekannten digitalen Produkten abhebt, wodurch vorherige Erfahrungen der Nutzenden maßgeblich die Bedienbarkeit eines neuen digitalen Produkts und damit den ECL beeinflussen (Oviatt et al., 2006). So wie Vorerfahrungen mit digitalen Lernprodukten den ECL verändern, wird bei der CLT die Annahme getroffen, dass das Vorwissen bezogen auf den Lerngegenstand einen Einfluss auf den ICL hat (Moreno & Park, 2010; Sweller, 1994, 2010a). Weiterhin führt Schrepp (2018b) innerhalb der Nutzungserlebnis-Dimension

Stimulation Gamification als Beispiel an, um die Nutzenden geistig anzuregen und zu motivieren. Einen theoretischen Zusammenhang zwischen der CLT und Gamification konnte Su (2016) mittels Strukturgleichungsmodellierung nachweisen, wonach sich der CL durch eine hohe Stimulation verringern lässt.

2.6 Immersion

Immersion ist ein verbreitetes Konzept, das meist im Zusammenhang mit digitalen Anwendungen wie VR-Anwendungen und Computerspielen beschrieben wird (Georgiou & Kyza, 2017b). Auch wenn kein allgemeiner Konsens über die Definition der Immersion herrscht, beschreibt Murray (2001, S. 99) Immersion

als einen metaphorischen Begriff, der sich aus der körperlichen Erfahrung des Untertauchens in Wasser ableitet: Bei einer psychologisch immersiven Erfahrung tritt dasselbe Gefühl auf wie bei einem Sprung in den Ozean oder in den Swimmingpool: das Gefühl, von einer völlig anderen Realität umgeben zu sein, die sich so sehr unterscheidet wie das Wasser von der Luft, und die unsere gesamte Aufmerksamkeit, unseren gesamten Wahrnehmungsapparat, in Anspruch nimmt.

Abseits interaktiver digitaler Anwendungen ist die Immersion ein Forschungsgegenstand in den Domänen Musik (Amatriain et al., 2007), Film (Visch et al., 2010) und Literatur (Ryan, 2003). Aufgrund der Multidisziplinarität und der daraus resultierenden abweichenden Auffassungen des Immersionskonzepts wird die Vergleichbarkeit zwischen den Studien erschwert bis unmöglich. In diesem Kapitel wird daher ein Überblick über die unterschiedlichen Sichtweisen der Immersion gegeben, diese wird von den oftmals synonym verwendeten Konstrukten *Flow* (dt. Fluss) und *Presence* (dt. Anwesenheit) abgegrenzt und das von Georgiou und Kyza (2017b) verwendete Immersions-Konzept, das gleichzeitig die Grundlage der Untersuchung der vorliegenden Arbeit darstellt, wird beschrieben.

Agrawal et al. (2019) sowie Georgiou und Kyza (2017b) beschreiben auf Basis zurückliegender Studien zwei wesentliche Sichtweisen zu Immersion: 1. Immersion als *objektive Eigenschaften des Systems/der Technologie* und 2. Immersion als *individueller psychologischer Zustand*. Die Sichtweise von Immersion als objektive Eigenschaften des Systems bzw. der Technologie beruht auf der Annahme, dass sich Immersion aus mehreren charakteristischen Eigenschaften eines Systems zusammensetzt und damit objektiv bestimmbar sowie quantifizierbar ist (Agrawal et al., 2019). Diese Sichtweise stützt sich auf die von Slater und Wilbur (1997) aufgestellte Definition, nach der die Immersion alle objektiven und messbaren Eigenschaften virtueller Umgebungen umfasst, insoweit die Computerbildschirme in der Lage sind, den Sinnen eines menschlichen Teilnehmenden eine umfassende, umgebende und lebendige Illusion der Realität zu vermitteln. Diese Eigenschaften bestehen im Wesentlichen aus den Faktoren *inclusive* (Grad der Ausblendung von Reizen der realen Welt), *extensive* (Anzahl berücksichtigter Sinnesmodalitäten), *Surrounding* (Größe des Sichtfelds) und *vivid* (Auflösung des Displays).

In den Folgejahren (2003, 2009) wurde von Slater an dieser Definition festgehalten und aufgrund fortschreitender technologischer Möglichkeiten wurde sie um *Tracking* und *Sensorimotor Contingencies* (Ausführen einer Handlung, die zur Wahrnehmung führt) ergänzt. Diese limitierte und auf VR zugeschnittene Sichtweise wird zwar von weiteren Autoren wie Bystrom et al. (1999) sowie Nash et al. (2000) geteilt, jedoch stellen Agrawal et al. (2019) heraus, dass diese Überzeugung von einer Minderheit der Forschenden vertreten wird.

Eine prominenter vertretene Sichtweise stellt die Immersion als individuellen psychologischen Zustand dar, der dadurch gekennzeichnet sein kann, dass sich eine Person von einer Umgebung, die einen kontinuierlichen Strom von Reizen und Erfahrungen liefert, umgeben, eingeschlossen und mit ihr interagierend wahrnimmt (Witmer & Singer, 1998, S. 227). Während über die Sichtweise von Immersion als individueller psychologischer Zustand zwischen einer Vielzahl von Autoren breiter Konsens herrscht, lassen sich innerhalb dieser Überzeugung drei Gründe voneinander abgrenzen, die zu einer immersiven Erfahrung führen:

1. Subjektives Gefühl, umgeben zu sein, bzw. multisensorische Stimulation
2. Absorption in der Erzählung bzw. Darstellung der Erzählung
3. Absorption bei strategischen oder taktischen Herausforderungen

Das Konzept der Immersion als subjektives Gefühl, umgeben zu sein, basiert darauf, äußere Störfaktoren, die die Aufmerksamkeit von der Aktivität lösen, durch multisensorische Stimulation zu kompensieren. Nach Biocca und Delaney (1995) ist demnach die Immersion durch die Anzahl der angesprochenen Sinne und durch den Grad der Abschottung von der Realität bestimmt. Thon (2008, S. 32) merkt jedoch an, dass die multisensorische Stimulation und das Blocken der Realität nicht mit einem psychologischen immersiven Zustand gleichzusetzen sind, diesen jedoch ermöglichen können, da eine Aufmerksamkeitsverschiebung behindert wird.

Ein weiterer Grund für die Immersion kann die Absorption durch das Narrativ bzw. durch Storyelemente darstellen (Ermi & Mäyrä, 2005). Nach Ryan (2003) kann die Immersion in räumliche, zeitliche und emotionale Immersion gegliedert werden. Räumliche Immersion tritt dann auf, wenn ein ausgeprägtes Raumgefühl entsteht und die Erkundung des Raums Freude bereitet. Zeitliche Immersion bezieht sich dagegen auf die sich entwickelnde Geschichte und aus der Neugierde, zu erfahren, was als Nächstes passiert. Emotionale Immersion kann in Szenarien auftreten, in denen eine emotionale Verbundenheit mit den Charakteren einer Geschichte auftritt. Abseits vom Kontext der Computerspiele geben vor allem die zeitliche und die emotionale Immersion Aufschluss darüber, dass Immersion auch beim Lesen eines spannenden Buchs auftreten kann, indem die Neugierde durch einen Spannungsbogen erzeugt und Empathie durch Hintergrundstorys der Charaktere ermöglicht wird.

Die Tatsache, dass ein psychologischer Zustand der Immersion abseits multisensorischer Stimulation und ausgefeilter Erzählung erreicht wird, lässt sich anhand des Spieleklassikers Tetris ableiten. Dieses unkomplizierte 2D-Spiel, bei dem herabfallende Blöcke durch Rotation eingepasst werden müssen, zeichnet sich weder durch eine anspruchsvolle 3D-Grafik aus, noch weist es Storyelemente auf. Die Immersion kann in diesem Szenario nach Adams (2014) durch strategische oder taktische Herausforderungen erreicht werden, die durch die nutzbare Zeit für Spielzüge bestimmt sind. Taktische Immersion kann demnach bei Spielen erreicht werden, die schnelle, intuitive Spielzüge erfordern (wie Tetris), wohingegen strategische Immersion bei Spielen auftreten kann, die Beobachtung, Berechnung und Planung bedürfen (wie Schach).

Der psychologische Zustand des völligen Eintauchens in eine medialisierte Umwelt ist nach Weibel und Wissmath (2011) kein neues psychologisches Konstrukt, sondern lässt sich durch das von Nakamura und Csikszentmihalyi (2009) beschriebene Konzept des *Flows* sowie durch das Konzept der *Presence* (bspw. Witmer & Singer, 1998) beschreiben. Charakteristika des Flow-Erlebnisses umfassen u. a. einen intensiven Fokus und die Konzentration auf den aktuellen Moment, den Verlust des reflektierten Selbstempfindens, eine veränderte zeitliche Wahrnehmung und das Gefühl der Verschmelzung von Handlung und Bewusstsein (Nakamura & Csikszentmihalyi, 2009, S. 196). In Abgrenzung dazu beschreibt *Presence* die subjektive Erfahrung, an einem Ort oder in einer Umgebung zu sein, obwohl sich die Person physisch woanders befindet (Witmer & Singer, 1998, S. 225). Georgiou und Kyza (2017b) fassen Flow und Presence als zwei optimale Zustände der Immersion auf, sodass die Immersion einen suboptimalen psychologischen Prozess beschreibt, der am Ende in Flow und Presence münden kann (s. a. Baños et al., 2004; Brown & Cairns, 2004; Jennett et al., 2008). Während Flow und Presence gemäß dem Alles-oder-Nichts-Prinzip lediglich als vorhanden oder nicht vorhanden erfasst werden können, bietet die Auffassung einer graduellen Immersion die Möglichkeit, verschiedene Systeme detaillierter zu vergleichen.

Neben der Erforschung der Immersion in kommerziellen virtuellen Umgebungen, mit dem Ziel, Anwendungen so zu gestalten, dass die Nutzenden möglichst lange und intensiv mit dem Medium interagieren, kann die Immersionsforschung auch dazu beitragen, Lernen zu ermöglichen und zu verbessern. Die positiven Auswirkungen immersiver virtueller Umgebungen hinsichtlich des Lernens wurden bereits in mehreren Studien untersucht (bspw. Brown & Cairns, 2004; M. T. Cheng et al., 2015; M.-T. Cheng et al., 2017; Georgiou & Kyza, 2017b; Schrader & Bastiaens, 2012). Darüber hinaus beschreibt Dede (2009) drei Wege, wie Immersion Lernen fördern kann: Multiperspektivität, situiertes Lernen und Transfer. Demnach erlaubt die multiperspektivische Betrachtung eines Lerngegenstands unterschiedliche Zugänge, sodass vielfältige und komplementäre Einsichten in komplexe Phänomene gewonnen werden können. Die Nutzung virtueller Lernumgebungen kann situiertes Lernen

ermöglichen, da der Lerngegenstand im authentischen Kontext erfahrbar wird. Darüber hinaus bieten immersive Lernumgebungen das Potenzial, einen Transfer von Fähigkeiten aus dem virtuellen in den realen Raum zu ermöglichen.

2.7 Empfundene Lernunterstützung

Die ELU kann nach B. Cheng et al. (2011) in die individuelle und die soziale ELU differenziert werden. Entsprechend der dieser Arbeit zugrunde liegenden Fragestellungen, ist insbesondere die individuelle ELU relevant. Sie bezieht sich darauf, inwieweit die Schüler:innen glauben, dass sich die Nutzung von AR bzw. von EUM auf ihre Lernleistung auswirkt. Ifinedo (2018) und B. Cheng et al. (2011) konnten in ihren Untersuchungen zeigen, dass die ELU ein wesentlicher Faktor für die spätere Weiternutzung von Informationssystemen ist (bspw. Weblogs (Ifinedo, 2018); kompetenzbasiertes eLearning (B. Cheng et al., 2011)). Damit einhergehend lassen sich Parallelen zum *Technology-Acceptance-Model* (TAM) nach Davis et al. (1989) identifizieren, das besagt, dass die Einstellung zur Nutzung (*Attitude towards Using*) von den beiden Variablen *wahrgenommene Nützlichkeit* (*Perceived Usefulness*) und *wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit* (*Perceived Ease of Use*) abhängig ist.

Die wahrgenommene Nützlichkeit beschreibt den individuellen Eindruck dahingehend, wie sehr eine Technologie zur Verbesserung der Arbeitsleistung führt. Ferner lässt die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit Aussagen über den subjektiven Eindruck dahingehend zu, wie gering oder hoch der Aufwand zum Erlernen der Technologie ist (Davis et al., 1989, S. 986). Die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit kann als kongruent mit dem in Kapitel 2.4 beschriebenen Konstrukt der Benutzerfreundlichkeit nach DIN EN ISO Norm 9241-11 (DIN, 2018-11-00) angesehen und im Wesentlichen durch die pragmatischen Qualitätskriterien des UEQ erfasst werden. Darüber hinaus konnte Ifinedo (2018) einen signifikanten positiven Zusammenhang zwischen der ELU und der wahrgenommenen Nützlichkeit des TAM feststellen und verweist auf ähnlich beobachtete Phänomene in B. Cheng et al., 2011; I.-F. Liu et al., 2010; Lowe et al., 2013, die auf eine Ergänzung des TAM um weitere Faktoren hindeuten. Eine hohe ELU hat daher, über die wahrgenommene Nützlichkeit, einen indirekten Einfluss auf die weitere Nutzung einer Technologie. Darüber hinaus lassen sich Zusammenhänge zur CLT herstellen, da ein Medium als nützlich wahrgenommen wird, wenn es keine irrelevanten Informationen beinhaltet, die die Lernenden von der Arbeit ablenken (ECL), und es somit dem Lernen zuträglich ist (vgl. GCL). Neben Aussagen über die Akzeptanz einer Technologie kann die ELU auch als Indikator für das Lernen selbst angesehen werden (Alqurashi, 2019), da es die subjektive Meinung über gewonnene Erkenntnisse und den Lernprozess wiedergibt. Die Erfassung der ELU kann,

neben objektiven Messungen (wie der des Lernzuwachses (LZ)), Aufschluss über die Qualität der Lehre geben und somit letztlich die Lernerfahrung verbessern.

2.8 Kognitive Leistung

Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe, die im Rahmen der objektiven kognitiven Leistungsmessung angewandt werden. Als zentral kann der Begriff des *Wissens* angesehen werden, der je nach lerntheoretischer Sichtweise verschieden ausgelegt wird (Greeno et al., 1996) und daher keiner einheitlichen Definition folgt. Spörhase-Eichmann (2015) unterscheidet zwischen Information und Wissen, wonach Information bspw. durch Daten und Fakten charakterisiert ist. Wissen stellt hingegen nach Cranach und Bangerter (2000, S. 227) „bedeutungsvoll verarbeitete Information“ dar, die darüber hinaus „irgendwann einmal bewußt verarbeitet [wurde]“ (2000, S. 228). Reinmann-Rothmeier und Mandl (2000, o.S.) veranschaulichen diese Sicht:

Information ist der Rohstoff für die Bildung von Wissen. Damit aus Information Wissen wird, muss die Information in einem bedeutungshaltigen Kontext mit der Erfahrung einer Person und ihrem Vorwissen verknüpft werden. Wissen ist demnach mehr als die Ansammlung von Information.

Diese Auffassung des Wissensbegriffs folgt der Annahme des Kognitivismus und Konstruktivismus, dass Individuen basierend auf ihren bisherigen Erfahrungen über kognitive Schemata (vgl. Kapitel 2.3) verfügen, die einerseits zur Verarbeitung neuer Informationen genutzt werden und in die andererseits neue Informationen integriert werden können. Vor dem Hintergrund dieser Arbeit bezieht sich der Begriff des *Vorwissens* auf (biologisches) Fakten- und Konzeptwissen im Rahmen der studienrelevanten Inhalte der LS², über das die Teilnehmenden vor der Intervention verfügen. Das Vorwissen ergibt sich somit aus den Ergebnissen des entsprechenden Vorwissenstests (Pre-Tests) der jeweiligen Studie. Im Rahmen dieser Interventionen soll den Teilnehmenden Lernen ermöglicht werden. *Lernen* bezeichnet im konstruktivistischen Sinne „die Aufnahme von Informationen und die Erarbeitung von Wissen auf Grundlage der individuellen Voraussetzungen. Jedes Lernen führt damit zur Veränderung vorhandener Wissensstrukturen bzw. zur Veränderung verfügbarer Vorstellungen“ (Spörhase-Eichmann, 2015, S. 64).

Gemäß den Zielsetzungen des Unterrichts in Form von Lernzielen bieten Lernerfolgskontrollen die Möglichkeit, den Lernprozess der Schüler:innen objektiv zu evaluieren und sicherzustellen. In Abgrenzung zu Lernerfolgskontrollen sind Leistungsbeurteilungen zwar auch eine Form der Leistungsmessung, jedoch erfüllen diese nicht primär eine Rückmelde- und Anreizfunktion,

² Um die studienrelevanten Aufgaben von den nicht-studienrelevanten Aufgaben abzuheben, werden erstere als Lernsettings (LS) bezeichnet.

sondern eine Selektions-, Berechtigungs-, Disziplinierungs- und Berichtsfunktion. In der vorliegenden Arbeit wird daher der Begriff *Lernerfolg* für die Ergebnisse der Post-Tests verwendet, die nach einer Intervention erfolgt sind. Der Post-Test als Lernerfolgskontrolle stellt ein objektives Testverfahren dar, weil er auf den zuvor definierten Lernzielen basiert (wie auch die Intervention), er lässt jedoch das Vorwissen der Teilnehmenden unberücksichtigt. Aus diesem Grund gilt es, den Lernerfolg von dem LZ abzugrenzen. Letzterer berücksichtigt das individuelle Vorwissen der Lernenden und berechnet sich aus der Differenz des Lernerfolgs (Post-Test) und des Vorwissens (Pre-Test). Zum einen kann bei der Evaluation der Intervention das Vorwissen als Störfaktor rausgerechnet werden, zum anderen wird der potenziell mögliche LZ durch die Höhe des Vorwissens eingeschränkt. Teilnehmende, die also bereits vor der Intervention über ein großes Vorwissen verfügen, können daher potenziell weniger dazulernen als solche ohne großes Vorwissen. Auch fällt es Teilnehmenden mit großem Vorwissen aufgrund ausgeprägter kognitiver Schemata leichter, neue Informationen zu verarbeiten und zu integrieren, sodass in den Studien dieser Arbeit nicht der absolute LZ herangezogen wird, sondern (wie in Kapitel 5.9.6 ausführlicher dargelegt) der relative LZ nach Hake (1998).

2.9 Aktueller Forschungsstand zur Lernwirksamkeit von Augmented Reality

Seit den 2000er Jahren nimmt die Aufmerksamkeit an AR stetig zu (K.-H. Cheng & Tsai, 2013; Masneri et al., 2022). Dadurch eröffnen sich neue breite Forschungsfelder, was sich auch an der stetig steigenden Zahl an Publikationen im Kontext von AR und Bildung widerspiegelt (Akçayır & Akçayır, 2017; Garzón & Acevedo, 2019; M.-B. Ibáñez & Delgado-Kloos, 2018; Radu, 2014). Dieses Kapitel gibt daher einen Überblick über den aktuellen fachdidaktischen Forschungsstand von AR, mit dem Fokus auf den dieser Arbeit zugrunde liegenden Themenschwerpunkten und darüber hinaus.

Als zielführende Forschungsfelder sehen K.-H. Cheng und Tsai (2013) die Untersuchung von AR-Lernszenarien unter Berücksichtigung der Motivation, des CL, der wahrgenommenen Präsenz (vgl. Kapitel 2.6) sowie der UX. Küçük et al. (2014) konnten in ihrer Studie mit Fünftklässlern nachweisen, dass niedrige CL-Werte auftreten, wenn AR zum Englischlernen verwendet wird, dies jedoch unabhängig von der erbrachten Lernleistung ist. Darüber hinaus war die Einstellung zu AR positiv mit der Lernleistung korreliert. In einer Folgestudie unter Medizinstudierenden konnten in einem Kurs zur Neuroanatomie bei Teilnehmenden, die AR zum Lernen nutzten, niedrigere CL-Werte und im Vergleich zur Kontrollgruppe ein höherer LZ identifiziert werden. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch K.-H. Cheng (2015), der neben einem reduziertem CL sowie einem höherem LZ auch positive Auswirkungen von AR auf die Motivation feststellen konnte. K.-H. Cheng stellt jedoch heraus, dass ein niedriger CL kein Garant für eine positive Lerneinstellung ist. Lai et al. (2019) berichten bei Fünftklässlern im Unterrichtsfach Geographie über einen reduzierten ECL, einen höheren LZ sowie eine größere Motivation hinsichtlich des Unterrichtsgegenstands als bei Schüler:innen, die nicht mit AR arbeiteten. Die gleichen Effekte konnten bei Studierenden in einem Kurs mit dem Themenschwerpunkt Geomorphologie nachgewiesen werden (Turan et al., 2018). Thees et al. (2020) konnten unter Physikstudierenden zwar keine Verbesserung der Lernleistung feststellen, jedoch niedrigere ECL-Werte bei der Aufgabenbearbeitung mit AR. In einem vergleichbaren Studiensetting berichten Altmeyer et al. (2020) über höheren LZ im AR-Setting als bei der Kontrollgruppe, stellten aber keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des CL fest.

Die Forschung zum Zusammenhang zwischen Immersion und Lernen in AR-basierten Lernszenarien befindet sich noch in einer frühen Phase (Georgiou & Kyza, 2018). Die Anfänge gehen auf Dunleavy et al. (2009, S. 20) zurück, die in immersiven hybriden Lernumgebungen, in denen digitale und physikalische Objekte kombiniert werden, Potenziale in der Verbesserung der Wissensprozessierung, im kritischen Denken, im Problemlösen sowie in der Kollaboration sehen (s. a. Dalgarno & Lee, 2010). Bressler und Bodzin (2013) bestätigen in

ihren Untersuchungen eine Unterstützung der kollaborativen Fähigkeiten bei Schüler:innen der sechsten bis achten Jahrgangsstufe infolge von Flow-Erfahrungen mit AR-Anwendungen.

In neueren Publikationen von Georgiou und Kyza (2017a, 2017b, 2018, 2021) wird das auf die Forschung von Nakamura und Csikszentmihalyi (2009) zurückgehende Konzept des Flows aufgegriffen und die Immersion wird als ein „abgestufte[r] psychologische[r] Prozess des Engagements, der Flow hervorrufen kann“ (Georgiou & Kyza, 2017b, S. 26), beschrieben (vgl. Kapitel 2.6). In ihren Studien konnten Georgiou und Kyza (2018, 2021) einen positiven Zusammenhang zwischen dem Grad der Immersion und der Lernleistung feststellen. Des Weiteren konnte die Motivation der Teilnehmenden als wesentlicher Einflussfaktor auf die Immersion identifiziert werden (Georgiou & Kyza, 2018).

Die Erfassung der Benutzungsfreundlichkeit und der UX kann hilfreich sein, um die jeweilige Anwendung hinsichtlich ihrer Stärken und Schwächen zu analysieren und ggf. zielgerichtete Änderungen vornehmen zu können. Weiterhin können verschiedene Versionen der gleichen Anwendung verglichen und die Auswirkungen technischer Änderungen können objektiv dargestellt werden. Der direkte Vergleich zweier unterschiedlicher Anwendungen ist hingegen nur bedingt zielführend, da es sich bei der UX um ein vielschichtiges Konstrukt handelt, das die Beziehung der Nutzenden zur jeweiligen Anwendung erfasst. Hierzu bieten sich jedoch Benchmark-Vergleiche an, da diese auf einer großen Datengrundlage von unterschiedlichen Anwendungen basieren. Im Kontext von AR konnten Di Serio et al. (2013) mithilfe von Benutzungsfreundlichkeitsstudien nachweisen, dass Schüler:innen der Mittelstufe (vergleichbar mit Sekundarstufe I) keine Schwierigkeiten bei der Nutzung der Technologie hatten, obwohl diese ihnen unbekannt war. Weiterhin konnten Thees et al. (2020) sowie Altmeyer et al. (2020) *gute* bzw. *exzellente* Bewertungen der Benutzungsfreundlichkeit im Einsatz von HMDs erreichen.

Dhir und Al-kahtani (2013) beschrieben und evaluierten unterschiedliche Messmethoden zur Erfassung der Benutzungsfreundlichkeit und der UX anhand mehrerer AR-Prototypen, darunter auch der AttrakDiff-Fragebogen (Hassenzahl et al., 2003), der wie der UEQ (vgl. Kapitel 2.5, 5.9.3) als semantisches Potenzial formuliert ist, jedoch einen größeren Fokus auf die Erfassung hedonischer Qualitätskriterien legt. Weitere Effekte von AR in Lernszenarien zeigen sich in einem verbesserten räumlichen Lernen (K.-H. Cheng & Tsai, 2013; Yip et al., 2019) und in einer gesteigerten Lernmotivation beim Einsatz mobiler Technologien (Hanafi et al., 2017; Sotiriou & Bogner, 2008; Ullrich et al., 2010). Während in der Mehrheit der Studien die positiven Effekte von AR herausgestellt werden, gehören eine unzureichende Benutzungsfreundlichkeit und technische Probleme zu den meistgenannten Herausforderungen (Akçayır & Akçayır, 2017; Lin et al., 2011; Wu et al., 2013). Darüber hinaus sehen Dunleavy et al., 2009 logistische bzw. organisatorische Herausforderungen (durch

Betreuung und Gerätemanagement) sowie einen möglichen Cognitive Overload, was sich jedoch in den zahlreichen CLT-Studien nicht bestätigen ließ. Ferner stellten Squire und Klopfer (2007) heraus, dass ohne gutes UI und Instruktion weitere technische Probleme auftreten können. Um AR effektiv im Unterricht einsetzen zu können, sollte besonders in unteren Jahrgangsstufen aufgrund der höheren Anforderungen an das Klassenmanagement mehr Unterrichtszeit eingeräumt werden (Munoz-Cristobal et al., 2015).

3 Allgemeine und biologiedidaktische Grundlagen zur Planung der Lehr-Lern-Umgebungen

Diesem Kapitel liegen die didaktische Planung der Unterrichtseinheiten der *Aufbau des menschlichen Gehirns*, die *Pathologie der Alzheimer-Demenz* sowie der *Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten* zugrunde. Das Ziel ist es, den Unterrichtsgegenstand einer fachwissenschaftlichen Betrachtung zu unterziehen und diese durch konkrete Lernziel- und Kompetenzformulierung in Form einer didaktisch-methodische Analyse für den Unterricht aufzubereiten. Als Grundlage dienen hierzu die aktuellen rheinland-pfälzischen Lehrpläne für die Sekundarstufen I und II (MWWK, 1998, 2014), die Beschlüsse der Kultusministerkonferenz zu einheitlichen Prüfungsanforderungen (KMK, 2004), zur Bildung in der digitalen Welt (KMK, 2016) und zu den Bildungsstandards der Sekundarstufe II im Fach Biologie (KMK, 2020) sowie einschlägige fachdidaktische Literatur zur Unterrichtsplanung (Klafki, 1964; Berck & Graf, 2003 und 2010; Spörhase-Eichmann, 2015; Killermann et al., 2011 u.a.). Weiterhin gilt es, die Implikationen der empirischen Untersuchung bei der Unterrichtsplanung im Blick zu behalten, um einerseits objektive, valide und reliable Ergebnisse zu erhalten und andererseits realitätsnahen Unterricht zu ermöglichen.

3.1 Der Aufbau des menschlichen Gehirns und die Pathologie der Alzheimer-Demenz

Aufgrund der inhaltlichen Nähe der Unterrichtseinheiten der *Aufbau des menschlichen Gehirns* und die *Pathologie der Alzheimer-Demenz* erfolgt in den Folgekapiteln eine gemeinsame didaktisch-methodische Aufbereitung dieser Unterrichtseinheiten. Zunächst werden die Unterrichtsinhalte einer fachwissenschaftlichen Betrachtung (vgl. Kapitel 3.1.1) unterzogen, die Lernziele und Kompetenzen definiert (vgl. Kapitel 3.1.2) um darauf aufbauend eine didaktische Transformation (vgl. Kapitel 3.1.3) der fachlichen Inhalte vornehmen zu können. Darüber hinaus werden methodische Überlegungen (vgl. Kapitel 3.1.4), Voraussetzungen für die unterrichtliche Umsetzung erläutert und der Ablauf der Lehreinheit in übersichtlicher tabellarischer Form dargestellt (vgl. Kapitel 3.1.6).

3.1.1 Fachliche Charakterisierung der Unterrichtsinhalte

Der Aufbau des menschlichen Gehirns

Das menschliche Gehirn lässt sich unterschiedlich gliedern: Aus entwicklungsbiologischer Perspektive geht das adulte Gehirn mit fortschreitender Embryogenese aus drei Bläschen des Neuralrohrs – dem anfänglichen Vorder-, Mittel- und Rautenhirn (*Prosencephalon*, *Mesencephalon* und *Rhombencephalon*) – hervor (Campbell et al., 2012), sodass sich die endgültig entwickelten Strukturen des Erwachsenengehirns wie folgt zuordnen lassen: Aus dem Vorderhirn gehen Groß- und Zwischenhirn hervor. Das Mittelhirn stellt einen späteren Teil des Hirnstamms dar, der sich jedoch inklusive Brücke, *Medulla oblongata* und Kleinhirn zum größten Teil aus dem Rautenhirn entwickelt. Die herausgebildeten Regionen des adulten Gehirns übernehmen unterschiedliche Funktionen, die jedoch nicht zwingend den entwicklungsbiologischen Regionen entsprechen, weshalb im Folgenden der Fokus auf dem Hirnstamm, dem Kleinhirn, dem Zwischenhirn und dem Großhirn liegt.

Der Hirnstamm bildet eine stielartige, nach oben verdickte Verbindung zwischen dem Rückenmark und den höheren Gehirnzentren und gliedert sich in Mittelhirn (*Mesencephalon*), Brücke (*Pons*) und *Medulla oblongata*. Funktional ist der Hirnstamm wesentlich an der Homöostase (Atmung, Herz- und Blutgefäßaktivität, Schlucken, Erbrechen und Verdauung), der Bewegungskoordination (die meisten Axone der rechten und linken Gehirnhälfte kreuzen in der *Medulla*) sowie der Informationsübermittlung von und zu den höheren Gehirnzentren beteiligt (Campbell et al., 2012). Das Kleinhirn (*Cerebellum*) schließt posterior an den Hirnstamm und caudal an das Großhirn (*Cerebrum*) an. Wie das *Cerebrum* ist auch das *Cerebellum* in zwei Hemisphären gegliedert, die über den wulstförmigen *Vermis* miteinander verbunden sind (Drimalla, 2011). Aufgrund der starken Faltung der Kleinhirnrinde fasst es über fünfmal mehr Neurone als das sechsfach größere *Cerebrum*. Im Parasagittalschnitt wird diese Faltung besonders sichtbar. Sie wird aufgrund der sich verzweigenden Nervenzellfasern der weißen Substanz als Lebensbaum (*Arbor vitae*) bezeichnet (Drimalla, 2011).

Das Kleinhirn übernimmt essenzielle Aufgaben der Bewegungskoordination sowie der Gleichgewichtskontrolle, indem es „motorische und perzeptorische Funktionen koordiniert und Fehlerkorrekturen durchführt“ (Campbell et al., 2012, S. 1442). Das Zwischenhirn (*Diencephalon*) liegt cranial zum Hirnstamm und eingebettet in das *Cerebrum*. Es lassen sich die Hirnregionen *Thalamus*, *Hypothalamus* und *Epithalamus* unterscheiden. Der *Thalamus* und der *Hypothalamus* sind „wichtige Integrationszentren, die als Umschaltstationen [...] für den Informationsfluss im Körper dienen“ (Campbell et al., 2012, S. 1442), wohingegen der *Epithalamus* für die Produktion von Melatonin und der Cerebrospinalflüssigkeit verantwortlich ist (Campbell et al., 2012).

Wie bereits angekündigt, lässt sich das *Cerebrum* in zwei Hemisphären einteilen, die durch den Balken (*Corpus callosum*) miteinander verbunden sind (Campbell et al., 2012). Die Oberfläche ist stark gefaltet und gewunden. Diese evolutionäre Anpassung dient der Oberflächenvergrößerung, um einerseits mehr Nervenzellen auf kleinerem Raum zu platzieren und andererseits deren Nährstoffversorgung sicherzustellen (Beck et al., 2016). Durch die starke Auffaltung entstehen auf der Großhirnrinde (*Cortex*) Furchen (lat. *sulci*) und Windungen (lat. *gyri*), die eine weitere regionale Einteilung des Großhirns in Lappen ermöglichen. Am Hinterkopf, oberhalb des Kleinhirns, befindet sich der Hinterhauptlappen (*Okzipitallappen*), der vor allem die neuronale Verarbeitung des Sehens übernimmt. Rechts und links verlaufen jeweils die Schläfenlappen (*Temporallappen*), in denen Informationen für das Hören und insbesondere für das Sprachverständnis verarbeitet werden. Oberhalb von *Okzipital- und Temporallappen* befindet sich der Scheitellappen (*Parietallappen*); dieser erhält über Rezeptoren in der Haut Informationen über Temperatur, Schmerz, Tast- und Druckempfindungen (Leyh, 2011b). Darüber hinaus laufen im Parietallappen Informationen aus dem Bewegungsapparat zusammen, was die Propriozeption ermöglicht (Leyh, 2011b).

Mit knapp 40 % der Fläche nimmt der Stirnlappen (*Frontallappen*) den größten Teil des *Cerebrums* ein. Dieser ist durch die Zentralfurche (*Sulcus centralis*) vom Parietallappen abgegrenzt. Funktional kann der Frontallappen in den *präfontalen Cortex* und den *motorischen Cortex* untergliedert werden. Während der motorische Cortex an der Zentralfurche gelegen ist und für willentliche (erlernte) Bewegungen verantwortlich ist, wird der präfontale Cortex in Zusammenhang mit „Aufmerksamkeit, Nachdenken, Entscheidung und Planung genannt und gilt als Sitz der Persönlichkeit“ (Leyh, 2011a). Bei Betrachtung von Längs- und Querschnitten des *Cerebrums* lassen sich von innen nach außen drei Schichten erkennen: die *Basalganglien*, das *Hirnmark* (oder auch weiße Substanz) und der *Cortex*. Letzterer ist zwischen 2 und 5 mm dick, umspannt das gesamte *Cerebrum* und besteht überwiegend aus Nervenzellkörpern. Aufgrund der gräulichen Färbung durch die Nervenzellkörper wird beim Cortex auch von der *grauen Substanz* gesprochen.

Die von den Nervenzellkörpern ins Innere des Gehirns ableitenden Nervenfasern sind von Myelinscheiden umgeben, die zur charakteristischen Färbung der weißen Substanz führen. Im Cortex laufen sämtliche Informationen aus anderen Gehirnregionen und Sinnesorganen zusammen, um einen ganzheitlichen „Eindruck der Umwelt“ (Pontes, 2011) zu erzeugen. Darüber hinaus wird im Cortex deklaratives Wissen konsolidiert und er bildet somit die Grundlage des Gedächtnisses. Tief im Innern des *Cerebrums* liegt das *limbische System*, das sich topographisch nur schwer anhand der Lage von anderen Gehirnstrukturen abgrenzen lässt. Nach gemeiner Betrachtung werden der *Hippocampus*, der *Gyrus cinguli*, der *Gyrus parahippocampalis*, die *Amygdala* und das *Corpus mamillare* zu den Teilbereichen des limbischen Systems gezählt. Das limbische System stellt eine relevante Schaltzentrale

zwischen dem Cerebrum und dem Diencephalon dar. Es übernimmt zentrale Aufgaben bei der Bildung neuer Erinnerungen und der Gedächtniskonsolidierung (*Hippocampus*) sowie der Bildung und Steuerung von Emotionen (*Amygdala*, *Gyrus cinguli*, *Corpus mammillare*) (Beck et al., 2016).

Anatomische Lagebeschreibungen

Zur Beschreibung der anatomischen Lage, der Richtungen und den Verläufen einzelner Körperstrukturen werden relativ zum Körper bezogene Termini verwendet. Dies erlaubt eine eindeutige Lagebezeichnung, unabhängig von der Positionierung des Körpers im Raum (Pschyrembel & Hildebrandt, 1994). Die in Tab. 2 erörterten Begriffe beziehen sich jedoch nur auf vielzellige Tiere, die eine bilaterale Körpersymmetrie aufweisen. Hiervon ausgenommen sind Tiere des Stamms Echinodermata (Stachelhäuter). Diese werden aufgrund ihrer bilateralen Symmetriestufe im Larvalstadium zwar den Bilateria zugeordnet, entwickeln jedoch im Zuge ihrer Metamorphose eine Radiärsymmetrie (Storch & Welsch, 2014). Ferner ist darauf hinzuweisen, dass in der anatomischen Beschreibung Begriffe synonym verwendet werden.

Tab. 2: Anatomische Lage- und Richtungsbegriffe (veränderte Darstellung nach Martini et al., 2012, S. 19)

Begriff	Region/ Bezugspunkt
anterior	Die Vorderseite; vor
ventral	Die Bauchseite (beim Menschen gleichbedeutend mit anterior)
posterior	Der Rücken, hinten
dorsal	Der Rücken (beim Menschen gleichbedeutend mit posterior)
kranial	Zum Kopf hin
superior	Über; oberhalb von
kaudal	Zum Schwanz hin (beim Menschen: zum Steißbein hin)
inferior	Unter; unterhalb von; zu den Füßen hin
medial	In Richtung der Mittellinie (Längsachse des Körpers)
lateral	Von der Mittellinie weg (Längsachse des Körpers)

Neben den Lage- und Richtungsbezeichnungen werden in der Anatomie ebenfalls Querschnitte zur Veranschaulichung von Strukturen am und im Körper genutzt. Dies gewann vor allem in Zuge der Entwicklung und Verbreitung elektronischer bildgebender Verfahren zusehends an Bedeutung. Mithilfe von drei Schnittebenen (vgl. Abb. 6), die jeweils senkrecht zueinander stehen, lässt sich ein Körper dreidimensional beschreiben. Die Transversalebene teilt den Körper in eine obere und eine untere Körperhälfte ein und folgt senkrecht dem Verlauf

von superior nach inferior (bzw. umgekehrt). Senkrecht dazu teilt die Sagittalebene den Körper in eine rechte und eine linke Körperhälfte. Ein lateraler Schnitt parallel zur Sagittalebene wird auch als *Parasagittalschnitt* bezeichnet. Der Frontalschnitt teilt den Körper in eine anteriore und eine posteriore Hälfte und verläuft damit, wie auch der Sagittalschnitt, parallel zur Längsachse des Körpers.

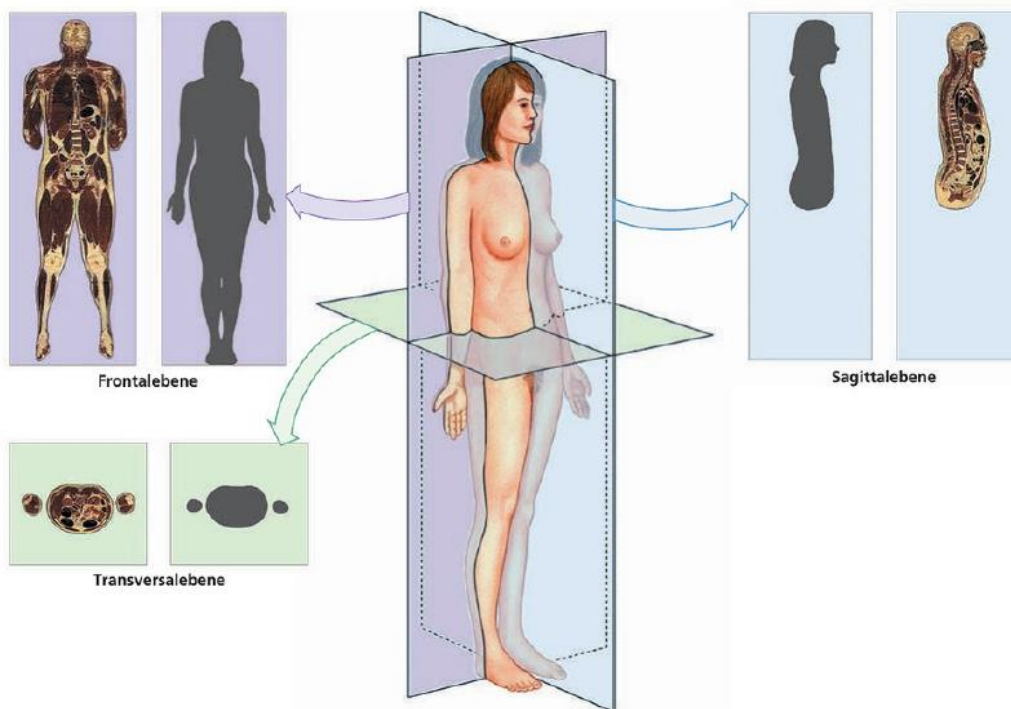


Abb. 6: Hauptschnittebenen des menschlichen Körpers (Martini et al., 2012, S. 20).

Nachdem die fachwissenschaftlichen Inhalte der Unterrichtseinheit zum Aufbau des menschlichen Gehirns erläutert wurden, folgt die fachwissenschaftliche Charakterisierung der Unterrichtsinhalte zur Pathologie der Alzheimer-Demenz.

Die Pathologie der Alzheimer-Demenz

Bei Demenzerkrankungen wird zwischen der vaskulären Demenz und der Alzheimer-Demenz unterschieden, wobei letztere mit ca. 80 % (in westlichen Ländern) deutlich häufiger vertreten ist (Hacke, 2016). Beide Demenzerkrankungen sind unabhängig voneinander, sodass Mischformen möglich sind. Weltweit wird geschätzt, dass 5 bis 10 % der über 65-Jährigen und 30 bis 40 % der über 80-Jährigen von der Alzheimer-Demenz betroffen sind (Hacke, 2016). Die Zunahme der Fälle steigt exponentiell mit dem Lebensalter, wobei sich die Zahl mit zunehmenden Lebensjahren etwa alle 4,4 bis 5 Jahre verdoppelt (Ganten et al., 2004). Der klinischen (symptomatischen) Phase geht häufig eine etwa 20-jährige Phase voraus, in der die pathologischen Veränderungen nahezu symptomfrei beginnen (Hacke, 2016).

Die pathologischen Veränderungen der Alzheimer-Demenz wurden das erste Mal im Jahr 1907 durch den Arzt Alois Alzheimer an der damals 51-jährigen Patientin Auguste Deter beschrieben. Er entdeckte neben degenerierten Nervenzellen der Hirnrinde eiweißreiche Ablagerungen, die sog. Plaques, sowie abnormale *intrazelluläre Fibrillen* (neurofibrilläre Bündel) (Luo, 2016). Diese extrazellulären (Amyloid-)Plaques sowie neurofibrillären Bündel sind charakteristisch für die Alzheimer-Demenz und grenzen diese von der vaskulären Demenz ab, bei der es infolge von Gefäßveränderungen zur Degeneration von Hirngewebe kommt (Hacke, 2016). Amyloid-Plaques sind aus 39 bis 43 Aminosäuren bestehende unlösliche Peptide. Aufgrund der Tendenz zur Formung von β -Faltblättern werden diese auch als *Amyloid- β -Protein* (kurz: A β) bezeichnet (Luo, 2016).

Genetische Untersuchungen haben gezeigt, dass A β Teil des transmembranen Amyloid-Precursor-Proteins (APP) ist (vgl. Abb. 7). Dieses besteht aus einer langen extrazellulären N-terminalen-Domäne, einer einzelnen transmembranen Domäne sowie einer kurzen cytoplasmatischen C-terminalen Domäne (Luo, 2016). Die Metabolisierung des APP kann in den *amyloidogenen* (pathologischen) und den *nicht amyloidogenen Weg* unterschieden werden (Salminen et al., 2013). Die Metabolisierung erfolgt über unterschiedliche Sekretasen, die das APP an bestimmten Stellen schneiden. Im Fall des nicht amyloidogenen Wegs schneidet in einem ersten Schritt die α -Sekretase das APP extrazellulär innerhalb des A β und teilt das APP in eine lösliche *APP_s- α -Domäne* und C83 (membranständiges, C-terminales-Fragment). Im nächsten Schritt wird C83 von der γ -Sekretase in p3 (extrazellulär) und AICD (*APP Intracellular Domain*) gespalten.

Der amyloidogene Weg wird durch die β -Sekretase initiiert, die APP in die lösliche *APP_s- β -Domäne* und C99 spaltet, sodass A β intakt bleibt. Im nächsten Schritt wird C99 von der γ -Sekretase in A β (extrazellulär) und AICD gespalten. In diesem Zustand kann A β noch von bestimmten Enzymen – bspw. *Insulin-degrading Enzyme (IDE)*, *Nepilysin (NEP)* – abgebaut werden. Im Fall der Alzheimer-Demenz kommt es jedoch zu einer abnormalen Akkumulation von A β , woraus die neurotoxischen Amyloid-Plaques entstehen (Reiss et al., 2018; Salminen et al., 2013).

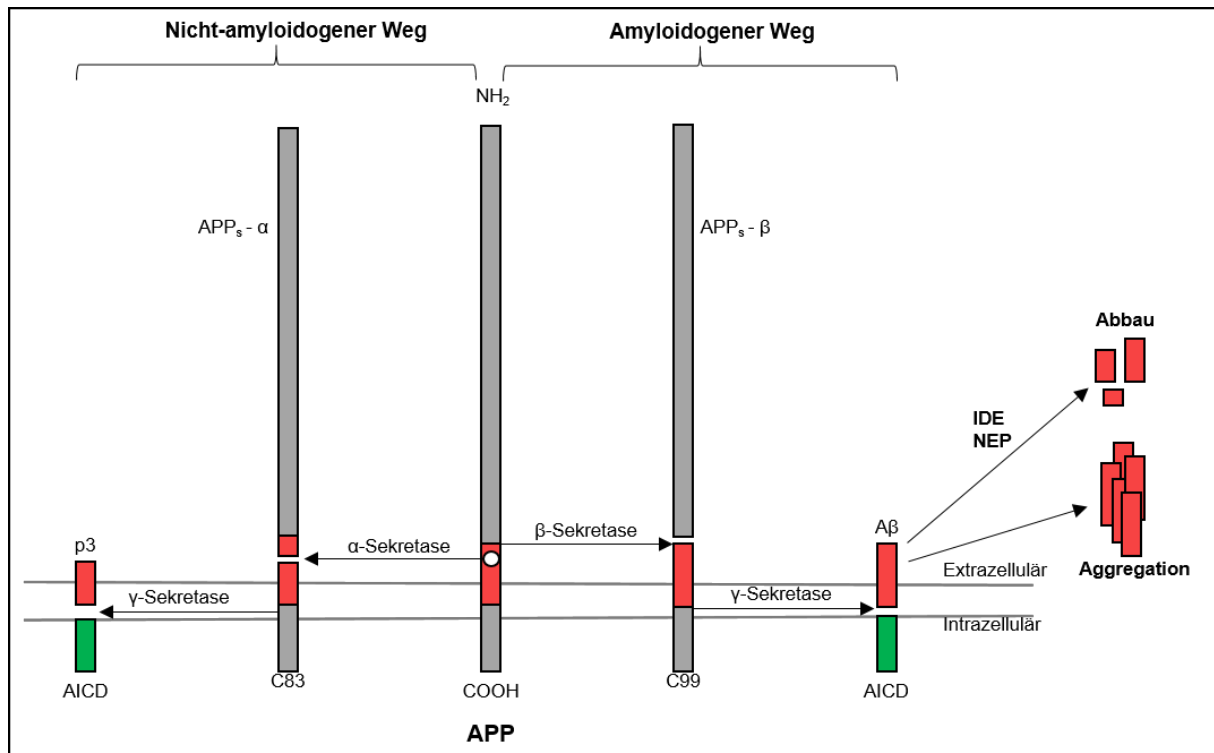


Abb. 7: Proteolytische Prozessierung des Amyloid-Precursor-Proteins (veränderte Darstellung nach Luo, 2016, S. 469 und Salminen et al., 2013, S. 35).

Ein weiterer Marker für die Alzheimer-Demenz sowie für andere neurodegenerative Erkrankungen sind die zuvor erwähnten neurofibrillären Bündel (engl. *neurofibrillary tangles* (NFT)) (Metaxas & Kempf, 2016). Diese NFT sind abnormale Aggregate aus hyperphosphorylierten *Tau*-Proteinen, die sich unter gewöhnlichen Umständen auf der Oberfläche von Mikrotubuli befinden und deren Stabilität regulieren (Campbell et al., 2012). Da NFTs nicht ausschließlich bei Alzheimer-Demenz auftreten, gilt das gemeinsame und übermäßige Auftreten von Amyloid-Plaques und NFT im Cortex, dem Hippocampus und der Amygdala als charakteristisches Merkmal der Krankheit (Luo, 2016).

Mit fortschreitendem Verlauf der Alzheimer-Demenz werden Neuronen dysfunktional: Synaptische Verbindungen gehen verloren, Dendriten und Axone verschlechtern sich und Neuronen sterben (Luo, 2016, S. 467). Infolgedessen findet zunächst eine Atrophie von Nervengewebe im limbischen System, insbesondere des Hippocampus, statt, was erste deutliche kognitive Einschränkungen und Probleme der Gedächtniskonsolidierung zur Folge hat. Die Neurodegeneration erreicht in späteren Stadien die Assoziationszentren des Temporal- sowie Parietallappens und breitet sich letztlich über den gesamten Cortex aus, sodass die Erkrankten ihren Alltag nicht mehr alleine bewältigen können und auf externe Hilfe angewiesen sind (Sternheim et al., 2017, S. 103). Als weiteres Symptom zeigen die Betroffenen häufig eine veränderte Persönlichkeit, wobei nahestehende Personen nicht oder nur noch sporadisch erkannt werden und ihnen häufig mit Abneigung begegnet wird (Urry et al., 2019, S. 1475).

3.1.2 Lernziele und Kompetenzen

Nach Killermann et al. (2011, S. 33) „[legt] ein Lernziel [...] fest, was der Schüler/die Schülerin [nach der Lehr-Lern-Einheit] wissen oder können soll, welche Einsichten er/sie gewinnen und welches Verhalten er/sie zeigen soll“. Lernziele erfüllen zudem bedeutsame Funktionen für die unterrichtliche Praxis, bspw. Schwerpunktsetzung, Orientierung und Kontrolle des Lernstands für die Schüler:innen und die Lehrkraft (Berck & Graf, 2010, S. 45). Darüber hinaus lassen sich nach Bloom (1972) Lernziele in die drei Taxonomien *kognitiv* (z. B. Kenntnisse, Wissen), *affektiv* (z. B. Werte, Einstellungen) und *psychomotorisch* (z. B. manuell-motorische Fertigkeiten) einteilen. Berck und Graf (2010) erweiterten diese Taxonomien um die formalen Lernziele und unterteilten diese in kognitiv-formale sowie psychomotorisch-formale Lernziele. Unter formalen Lernzielen wird der „Erwerb allgemeiner Kenntnisse, Fähigkeiten und Fertigkeiten, die sich nicht auf spezifisches Wissen beziehen“ (Berck & Graf, 2003), verstanden. Diese Definition bildet damit einen direkten Übergang zum Kompetenzbegriff nach Weinert (2002).

Die Kultusministerkonferenz (2020) teilt die Kompetenzen im Fach Biologie in die Bereiche Sach-, Erkenntnisgewinnungs-, Kommunikations- und Bewertungskompetenz ein. Weiterhin sind die 2016 verabschiedeten Beschlüsse zur „Bildung in der digitalen Welt“ (KMK, 2016) zu beachten, die die Vermittlung digitaler Kompetenzen als integrale Aufgabe aller Unterrichtsfächer beschreiben. Daher werden gemäß dem Studiendesign, bei dem der Fokus auf der Erforschung des kognitiven LZ und des CL (unter dem Einsatz von AR) liegt, besonders die Kompetenzbereiche Sachkompetenz (KMK, 2020) sowie die digitalen Kompetenzbereiche (KMK, 2016) *Kommunizieren und Kooperieren* (digitale Werkzeuge für die Zusammenarbeit bei der Zusammenführung von Informationen, Daten und Ressourcen nutzen) sowie *Problemlösen und Handeln* (eine Vielzahl von digitalen Werkzeugen kennen und kreativ anwenden) angesprochen. Die nachfolgend formulierten Lernziele dienen zum einen der Strukturierung der Stunde und zum anderen sind sie Grundlage der Leistungsmessungen.

Die Schüler:innen sollen ...

1. die Alzheimer-Demenz als eine Erkrankung des Gehirns identifizieren können (kognitiv).
2. die Anatomie des menschlichen Gehirns sowie die Funktionen ausgewählter Gehirnareale beschreiben können (kognitiv).
3. die Schnittebenen benennen und auf unterschiedliche anatomische Abbildungen anwenden können (kognitiv).
4. anhand symptomatischer Auffälligkeiten Vermutungen aufstellen, welche Gehirnregionen von der Alzheimer-Demenz betroffen sind (kognitiv).

5. die pathologischen Veränderungen der einzelnen Alzheimer-Demenz-Phasen in den betroffenen Gehirnarealen beschreiben und daraus resultierende funktionale Beeinträchtigungen erläutern können (kognitiv).
6. empathisch mit der Lebenssituation an Alzheimer-Demenz erkrankter Personen umgehen können (affektiv).

Digitale Kompetenzen

Die Schüler:innen sollen ...

7. Informationen aus der AR-App analysieren können (Suchen und Verarbeiten).
8. die AR-App bei der gemeinsamen Erarbeitung nutzen können (Kommunizieren und Kooperieren).
9. AR kennen und es als digitales Werkzeug zum kreativen Problemlösen anwenden können (Problemlösen und Handeln).

3.1.3 Fachdidaktische Begründung der Stoffauswahl

Zur Auswahl der Unterrichtsinhalte stellen die Lehrpläne der einzelnen Bundesländer Vorgaben auf, die bei der Planung von Unterricht berücksichtigt werden müssen. Da die Studien an rheinland-pfälzischen Gymnasien sowie integrativen Gesamtschulen durchgeführt wurden, gelten an dieser Stelle für die Sekundarstufe I die „Lehrpläne für die naturwissenschaftlichen Fächer für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz“ (MWWK, 2014) und für die Sekundarstufe II gilt der „Lehrplan Biologie – Grund- und Leistungsfach der Jahrgangsstufen 11 bis 13 der gymnasialen Oberstufe (Mainzer Studienstufe)“ (MWWK, 1998).

Das „Themenfeld 7: Informationen empfangen, verarbeiten, speichern“ des Lehrplans für die Sekundarstufe I (MWWK, 2014, S. 36–37) beinhaltet u. a. das „*Sprechen über Lernen und Lernprozesse*“, „*Gedächtnisleistung*“ sowie die „*Erregungsweiterleitung bis zur Verrechnung und Speicherung im Gehirn*“ und bietet somit Anknüpfungspunkte für eine anatomische und funktionale Betrachtung des menschlichen Gehirns mit kontextuellem Bezug zur Alzheimer-Demenz. Alternativ wird im Lehrplan formuliert: „*Der Blick in das Gehirn und Gedächtnismodelle schaffen Gelegenheit, über Lernen zu sprechen, Lernprozesse zu erklären und Lernstrategien biologisch zu begründen.*“ (MWWK, 2014, S. 37). Dies gilt als Differenzierungsmöglichkeit, sodass sich die Unterrichtseinheit ebenfalls als vertiefender Exkurs in die Unterrichtsreihe integrieren lässt. Des Weiteren lässt sich die Unterrichtseinheit im „*Leitthema 4: Information und Kommunikation bei lebenden Systemen*“ im Lehrplan der Sekundarstufe II (MWWK, 1998, S. 56–63) innerhalb einzelner Pflicht- und

Wahlpflichtbausteine verorten. Tab. 3 fasst einzelne thematische Anknüpfungspunkte zusammen.

Tab. 3: Ausgewählte Lehrplaninhalte Leitthema 4: Information und Kommunikation bei lebenden Systemen der Sekundarstufe II (nach MWWK, 1998, S. 56–63).

Baustein	Inhalte (Auswahl)
Informationsverarbeitung	Kenntnis anatomischer Strukturen des menschlichen Nervensystems
Reizaufnahme und -beantwortung	Kenntnis der Reizverarbeitung im menschlichen Zentralnervensystem Gehirn und Rückenmark
Lernen und Gedächtnis	Einblick in die Neurobiologie des Lernens
Eigenes Bausteinthema	Die pathologischen Veränderungen des Zentralnervensystems infolge der Alzheimer-Demenz und deren Auswirkungen auf das Lernen sowie das Verhalten betroffener Personen

Auf Grundlage dieser curricularen Vorgaben erfolgt die konkrete unterrichtliche Planung unter didaktischen und methodischen Gesichtspunkten. Es wurden, unter Berücksichtigung des Lernpotenzials der Lernenden, die zu unterrichtenden Inhalte auf Grundlage einer fachwissenschaftlichen Analyse (vgl. Kapitel 3.1.1) ausgewählt und unter Anwendung von Unterrichtsprinzipien strukturiert und begründet. Gemäß dem *Primat der Didaktik* in Klafkis bildungstheoretischer Didaktik ist die methodische Analyse der didaktischen Analyse nachgeordnet. Da der vorliegenden Unterrichtseinheit empirische Fragestellungen zum Lernen mit digitalen Medien zugrunde liegen und diese der methodischen Analyse zugeordnet werden, erfolgten die didaktischen Vorentscheidungen stets im Einklang mit der medialen Umsetzbarkeit, sodass einerseits Unterrichtsprinzipien bei der Auswahl der Unterrichtsinhalte eingehalten wurden und andererseits eine Vergleichbarkeit der eingesetzten Medien (siehe Kapitel 3.1.7) gewährleistet werden kann.

Die didaktische Analyse nach Klafki (1964) stellt bei der Auswahl der Unterrichtsinhalte und bei der Planung von Unterricht fünf Grundfragen in den Fokus: die Gegenwartsbedeutung, die Zukunftsbedeutung, die Exemplarik (vgl. Wagenschein (1964)), die Zugänglichkeit sowie die Struktur des Inhalts. Die *Gegenwartsbedeutung* für die Lernenden im Hinblick auf die pathologischen und symptomatischen Veränderungen der Alzheimer-Demenz erschließt sich durch die hohe Wahrscheinlichkeit, von der Krankheit betroffene Personen im unmittelbaren Familienkreis zu haben. Durch die Vermittlung kognitiver Inhalte zur Pathologie der Alzheimer-Demenz sowie der starken affektiven Komponente soll die Unterrichtseinheit für das

Thema sensibilisieren und Erklärungen für die krankhaft bedingten Verhaltensänderungen bieten.

Die Alzheimer-Demenz wird aber auch in der *Zukunft* der Schüler:innen eine zentrale Rolle spielen, da mit steigendem Lebensalter die Wahrscheinlichkeit, an Alzheimer-Demenz zu erkranken, exponentiell steigt (Ganten et al., 2004), sodass auch die eigenen Eltern in einigen Jahren erkranken und pflegebedürftig werden können. Abgesehen von dem individuellen Bezug birgt die Alzheimer-Demenz das Potenzial, im Zuge des demographischen Wandels zu einer wachsenden volkswirtschaftlichen Belastung für zukünftige Generationen zu werden. Ein wesentliches Arbeitsfeld zur Abwendung der wirtschaftlichen Schäden liegt demnach in der Forschung zur Entwicklung wirksamer Medikamente zur Behandlung der Krankheit.

Als weiteres Kriterium stellt Klafki (1964) die *exemplarische Bedeutung* des Lerngegenstands heraus, die auf das von Wagenschein begründete Prinzip des Exemplarischen zurückgeht. Es sollen sich „an wenigen konkreten Beispielen Gesetzmäßigkeiten, Begriffe oder Methoden von allgemeiner Bedeutung erschließen“ (Killermann et al., 2011, S. 45) lassen. Somit lassen sich grundlegende Aussagen zum Aufbau des menschlichen Gehirns auf makro- und mikroskopischer Ebene erarbeiten sowie Erkenntnisse aus der Funktionsweise und Verschaltung einzelner Hirnregionen auf andere, weniger komplexe Organismen übertragen. Weiterhin lässt die Verknüpfung zwischen den pathologischen Veränderungen durch die Alzheimer-Demenz und der auftretenden Symptomatik Rückschlüsse auf andere neurodegenerative Erkrankungen zu. Der im Kontext der Alzheimer-Demenz genutzte Erkenntnisweg der Läsionsforschung bietet die Möglichkeit, Denk- und Arbeitsmethoden der Biologie nachzuvollziehen und diese im Sinne des Kompetenzbegriffs nach Weinert (2002) in anderen Situationen anzuwenden. Zuletzt wird der Lerngegenstand unmittelbar erfahrbar, da ein direkter Bezug zum Menschen hergestellt wird.

Was sich bei Klafki (1964) allgemein als *Zugänglichkeit* des Lerngegenstands beschreiben lässt, wurde in späterer Literatur weiterentwickelt und präzisiert. Gemeinhin wird im naturwissenschaftlichen Unterricht der Begriff *Einstieg* als Synonym für Eröffnungsphase, Hinwendung, Motivation, Problemgewinnung, Hinführung etc. verwendet (Berck & Graf, 2010, S. 213). Das Ziel ist nach Berck und Graf (2010, S. 213) die „Aktivierung der momentanen Lernmotivation“. Aufgrund der hohen Anschaulichkeit und der starken affektiven Komponente erfolgte der Einstieg anhand einiger Fallbeispiele aus einem aufgezeichneten Videointerview zwischen einem Arzt und mehreren an Alzheimer-Demenz Erkrankten, wodurch die Lernenden erstmals mit den Auswirkungen der Krankheit konfrontiert wurden. Es lassen sich bereits offensichtliche Defizite in der kognitiven und motorischen Leistungsfähigkeit, bspw. Vergesslichkeit, Wortfindungsstörungen, sowie die Beeinträchtigung erlernter Bewegungen (z. B. Schreiben und Zeichnen) beobachten. Während der Betrachtung der Videosequenz als

unbeteiligte Dritte werden den Schüler:innen häufig analoge Verhaltensmerkmale von demenzerkrankten Personen aus der eigenen Lebenswelt bewusst, was sich positiv auf die Motivation hinsichtlich des Lerngegenstands auswirkt und mit den elementaren Fähigkeiten des Gehirns vertraut macht.

Einen alternativen Einstieg in die Unterrichtseinheit bietet der von Killermann et al. (2011, S. 46) skizzierte historisch-genetische Weg, in dem „historische Fragestellungen der Wissenschaft wiederholt, ihre Experimente durchgeführt und ihre Lösungsfindung nachvollzogen“ werden. Dementsprechend könnte der Einstieg mithilfe eines nachgesprochenen Transkripts des ersten Interviews aus dem Jahr 1901 zwischen Alois Alzheimer und Auguste Deter erfolgen. Allerdings folgt die Wissensgenese auch in diesem Fall eher dem logisch-genetischen Weg, da zunächst anatomische und funktionale Grundlagen des Gehirns behandelt werden müssen. Aufgrund des dabei abgeschwächten affektiven Bezugs wurde der Einstieg via Videosequenz gewählt.

Als weitere didaktische Leitfrage stellt Klafki die *Struktur des Themas* in den Fokus. Um die pathologischen Veränderungen der Alzheimer-Demenz und die daraus resultierende Symptomatik nachzuvollziehen und beschreiben zu können, bedarf es anatomischer und funktionaler Grundlagen. Die Unterrichtseinheit folgt dem bereits angesprochenen logisch-genetischen Weg, indem durch eine sachlogische Struktur des Lerngegenstands der Lernprozess gestaltet wird (Killermann et al., 2011, S. 46). Da die Teilnehmenden laut Studiendesign über möglichst wenig Vorwissen verfügen sollen, wurde im ersten Teil der Unterrichtseinheit Grundlagenwissen zur Anatomie und Funktion des Gehirns vermittelt. Zunächst wird ein Überblick über den äußeren Aufbau des menschlichen Gehirns gegeben und die Einteilung in die Hirnregionen Frontal-, Temporal-, Parietal- und Okzipitallappen sowie Klein- und Stammhirn wird aufgezeigt. Bevor der innere Aufbau des menschlichen Gehirns erarbeitet wird, erfolgt eine kurze Einführung in die verschiedenen Schnittebenen, um die korrekte räumliche Vorstellung der Lernenden sicherzustellen. Im Anschluss wird das Wissen über die Schnittebenen durch die inhaltliche Einführung des Frontalschnitts vertieft.

In der folgenden Anwendungsaufgabe sollen mithilfe des neu angeeigneten Wissens bestimmte Regionen (Frontallappenbereich, Temporallappenbereich, Hippocampus und Ventrikel) in eine Abbildung des medialen Frontalschnitts eingezeichnet werden. Da sich die äußere Einteilung der Hirnregionen nur auf den Cortex bezieht, wurde – um Fehlvorstellungen zu vermeiden – eine Abbildung eingefügt, sodass Lernende den Frontal- und Stirnlappenbereich nur entlang der Hirnrinde verorten. Im weiteren Verlauf werden, gemäß dem Basiskonzept *Struktur und Funktion* (KMK, 2004), den zuvor behandelten Hirnregionen die entsprechenden Funktionen zugeordnet.

Im zweiten Teil der Unterrichtseinheit wird, dem Weg der Läsionsforschung folgend, auf die zuvor gelegten Grundlagen zurückgegriffen, indem die Lernenden die Symptome der Alzheimer-Demenz aus Interviews und einer fiktiven Krankenakte herausarbeiten. Durch den Rückschluss auf die Funktion der Hirnregionen können die Symptome bestimmten Arealen zugeordnet werden. Im weiteren Verlauf der Unterrichtseinheit werden die betroffenen Hirnregionen näher betrachtet und mit nicht pathologischen Gehirnmodellen verglichen. Bei dem äußeren Vergleich beider Gehirne wird der Substanzverlust durch breitere und tiefere Sulci sichtbar. Diese Atrophie zeigt sich ebenfalls bei dem Vergleich zweier Frontalschnitte, besonders im Bereich des Hippocampus. Infolge des Verlusts grauer Substanz sind vor allem der Cortex im Bereich des Frontal- und Temporallappens sowie das Gewebe entlang der Ventrikel betroffen, wodurch Letztere vergrößert erscheinen. Eine Atrophie im Mark ist hingegen kaum feststellbar. Da sich die Alzheimer-Demenz über Jahrzehnte im Gehirn manifestiert, wird anschließend der pathologische und symptomatische Verlauf der Krankheit erarbeitet, sodass die Lernenden am Ende der Unterrichtseinheit eine begründete Aussage darüber treffen können, in welcher Phase sich die eingangs interviewten Personen befinden.

3.1.4 Methodische Überlegungen

Die methodische Unterrichtsplanung befindet sich im Spannungsfeld zwischen der empirischen Studiendurchführung und realitätsnahem Unterricht. Um Verzerrungen und Störgrößen zu vermeiden, war es notwendig, die durchgeführten Unterrichtseinheiten klassen- und kursübergreifend hinsichtlich des Ablaufs so identisch wie möglich zu halten.

Zu Beginn der Unterrichtseinheit erfolgt eine lehrerzentrierte Einführungsphase, in der der organisatorische Rahmen, die Gruppeneinteilung, der Vorwissenstest, die Unterrichtsmaterialien (inklusive der AR-App) sowie das Vorgehen zum Ausfüllen der Fragebögen erläutert wird. Um Abweichungen zwischen den Klassen und Kursen zu vermeiden, erfolgt die Einführungsphase mittels PowerPoint-Folien (vgl. Anhang 1.1.1, S. A1 f.). Eine alternative Einführung mittels kurzer Videosequenz in Form eines Erklärvideos wäre ebenso denkbar. Da eine lehrerzentrierte Vorstellung aber eher dem realistischen Unterricht entspricht, wurde diese Idee verworfen.

Der Einstieg in die Thematik erfolgt mittels kurzer Videosequenz, in der ein Arzt mit mehreren Alzheimer-Erkrankten Anamnesegespräche führt (vgl. digitaler Anhang). Die Lernenden notieren sich gesundheitliche Auffälligkeiten, die im Nachhinein an der Tafel oder am Whiteboard gesammelt werden. Zudem geben sie eine begründete Einschätzung ab, welches Organ von der Krankheit betroffen ist. Um die effektive Lernzeit zu erhöhen, erfolgt die Auslegung der notwendigen Materialien vor Beginn der Unterrichtsstunde, dabei müssen jedoch die Hirnmodelle zurückgehalten werden, um der Hypothesenbildung nicht vorzugreifen.

Da für die pathologische Betrachtung der Alzheimer-Demenz Vorwissen zur Anatomie und Funktion des menschlichen Gehirns notwendig ist, werden diese Grundlagen im ersten Teil der Unterrichtseinheit gelegt.

In der folgenden Erarbeitungsphase wurde besonders bei der Gestaltung des Unterrichtsmaterials auf klare, verständliche Aufgabenstellungen geachtet, sodass den Lernenden in hohem Maße eigenständiges Arbeiten ermöglicht und Input der Lehrkraft minimiert wird. Nach Hillmayr et al. (2017, S. 14) liegen die lernförderlichen Potenziale digitaler Medien besonders im paarweisen Austausch miteinander. Um diese positiven Effekte zu nutzen, ist es den Teilnehmenden gestattet, die Aufgaben in Partnerarbeit zu lösen. Bei auftretenden Fragen ist darauf zu achten, dass die Lehrkraft keine konkreten Lösungen darbietet, sondern auf das vorhandene Material verweist und lediglich organisatorische Hilfestellungen gibt. Um Redundanzen innerhalb dieser Arbeit zu vermeiden, findet sich die detaillierte Beschreibung der einzelnen Aufgaben, inklusive der medialen Analyse von AR und EUM, in Kapitel 5.8.

Nachdem die Lernenden alle Aufgaben bearbeitet sowie Fragebögen und Tests absolviert haben, folgt die Sicherungsphase mit der Besprechung der Aufgaben. Diese ist mittels PowerPoint-Folien vorstrukturiert, sodass zeiteffektiv jede Aufgabe besprochen, die korrekten Lösungen eingeblendet und auftretende Fragen geklärt werden können. Während der Besprechung nimmt die Lehrkraft eine moderierende Rolle ein und die Lernenden präsentieren ihre Ergebnisse.

3.1.5 Voraussetzungen für die unterrichtliche Umsetzung

Neben den in Kapitel 5.8 beschriebenen Lernsettings der AR- und der EUM-Umsetzung, werden bestimmte Anforderungen an die teilnehmenden Schulen zur Durchführung der Unterrichtseinheit gestellt. Die Unterrichtseinheiten *Anatomie und Funktion des menschlichen Gehirns* sowie *Pathologie der Alzheimer-Demenz* benötigen zur jeweiligen Durchführung eine Doppelstunde (2 x 45 Minuten). Da die Unterrichtseinheit *Anatomie und Funktion des menschlichen Gehirns* das Grundlagenwissen für die Folgestunde vermittelt, ist eine alleinige Durchführung der Einheit zur *Pathologie der Alzheimer-Demenz* nicht zweckmäßig. Umgekehrt ist eine exklusive Durchführung der Stunde zur *Anatomie und Funktion des menschlichen Gehirns* zwar möglich, aber aufgrund der kontextuellen Einbettung in die Alzheimer-Demenz unter didaktischen Gesichtspunkten nicht ratsam. Darüber hinaus sollte auf folgende räumliche Gegebenheiten geachtet werden: Die Unterrichtseinheiten sind in einem Klassen- oder einem Fachsaal durchführbar, sofern die Räumlichkeit über einen Beamer, eine Projektionsfläche und eine Tafel oder ein Whiteboard verfügt. Darüber hinaus sind zur Einrichtung von Gruppenarbeitsplätzen, wie sie häufig in Fachsälen anzutreffen sind,

verrückbare Tische zweckdienlich. Falls keine Audiowiedergabe über externe Lautsprecher möglich ist, kann auf portable Lösungen zurückgegriffen werden.

3.1.6 Ablauf der Lehreinheit

In diesem Kapitel wird der Verlauf Unterrichtseinheiten *Der Aufbau des menschlichen Gehirns* und *Die Pathologie der Alzheimer-Demenz* mithilfe von Tab. 4 dargestellt, sodass die unterrichtlichen Schritte nachvollzogen werden können.

Tab. 4: Verlaufsplan der Unterrichtseinheiten *Der Aufbau des menschlichen Gehirns* und *Die Pathologie der Alzheimer-Demenz*.

Phase	Inhaltliche Schwerpunkte/Operationen	Sozial- und Aktionsform	Medien
Einführung	<ul style="list-style-type: none"> - Vorstellung Person und Projekt - Anknüpfung an Vorerfahrungen (AR) - Gruppeneinteilung und Vergabe von Kennung - Durchführung Pre-Test - Besprechung des Ablaufs und der Unterrichtsmaterialien 	LV	PowerPoint-Folien, Gruppenkarten mit Kennung (Anhang 1.1.1, S. A1 f.) Pre-Test (Anhang 2.2.1, S. A109 f.) Tablet, Lernheft inkl. Materialsammlung (Anhang 1.1.2 - 1.1.9, S. A80 f.), Modelle
Einstieg	<ul style="list-style-type: none"> - Interview Arzt und Alzheimer-Erkrankte - Symptome beschreiben - Sammeln der Symptome an der Tafel - Hypothesenbildung, welches Organ betroffen ist 	LV UG	Video Tafel/Whiteboard Lernheft
Erarbeitung	Eigenständige Bearbeitung der Aufgaben im Lernheft <ol style="list-style-type: none"> 1. äußerer Aufbau des menschlichen Gehirns <ol style="list-style-type: none"> 1.1. Datenerhebung 2. Innerer Aufbau des menschlichen Gehirns (Parasagittalschnitt) <ol style="list-style-type: none"> 2.1. Datenerhebung 3. Anatomische Schnittebenen 	EA/PA	Lernheft Materialsammlung Tablet (inkl. App) Modelle Gehirn Modelle Gehirnscheiben

Fortsetzung Tab. 4

	3.1. Datenerhebung 4. Innerer Aufbau des menschlichen Gehirns (Frontalschnitt) 4.1. Datenerhebung 5. Funktionen einzelner Gehirnregionen 5.1. Datenerhebung		
Erhebung	Durchführung Post-Test I	EA	Post-Test I (Anhang 2.2.1, S. A136 f.)
Erarbeitung	Weitere Symptome der Alzheimer-Demenz 6. Zuordnung der Symptome zu den betroffenen Gehirnregionen 7. Äußerer Vergleich: gesundes und pathologisches Gehirn 7.1. Datenerhebung 8. Innerer Vergleich gesundes und pathologisches Gehirn (Frontalschnitt) 8.1. Datenerhebung 9. Phasen der Alzheimer-Demenz (Pathologie und Symptome) 9.1. Datenerhebung 10. Einordnung der PatientInnen aus Video in einzelne Phasen	EA/PA	Lernheft Materialsammlung Tablet (inkl. App) Modelle Gehirn Modelle Gehirnscheiben
Erhebung	Post-Test II Abschlussbefragung	EA	Post-Test II Tablet
Sicherung	Besprechung der Aufgaben	UG	PowerPoint-Folien
LV – Lehrvortrag; UG – Unterrichtsgespräch; EA – Einzelarbeit; PA – Partnerarbeit			

3.1.7 Vergleich der Lernsettings: Augmented Reality vs. etablierte Unterrichtsmedien

Da in der empirischen Studie die Lernwirksamkeit von AR und EUM verglichen wird, müssen beide Medientypen bestimmte Anforderungen unter Einhaltung der Gütekriterien erfüllen. Die Konzeption der LS basiert auf den praktisch erprobten und evaluierten Unterrichtsmodulen von Sternheim et al. (2017), die dem Alzheimerkoffer beiliegen. Weiterhin wurde bei der Planung des Kontrollgruppendesigns darauf geachtet, dass sowohl für AR als auch für EUM gleiche Lernziele und gleiche Lerninhalte angewendet wurden, sodass sich die LS lediglich in

der medialen Darstellung unterscheiden und eine valide Vergleichbarkeit gewährleistet werden kann. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen LS erfolgt in Kapitel 5.8.

3.2 Der Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten

Als weiterer Teil der Hauptstudie wurde eine Unterrichtseinheit zum Thema der Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten konzipiert, sodass sich die Folgekapitel der didaktisch-methodischen Aufbereitung dieser Unterrichtseinheit widmen. Zunächst werden die Unterrichtsinhalte einer fachwissenschaftlichen Betrachtung (vgl. Kapitel 3.2.1) unterzogen, die Lernziele und Kompetenzen definiert (vgl. Kapitel 3.2.2) um darauf aufbauend eine didaktische Transformation (vgl. Kapitel 3.2.3) der fachlichen Inhalte vornehmen zu können. Darüber hinaus werden methodische Überlegungen (vgl. Kapitel 3.2.4), Voraussetzungen für die unterrichtliche Umsetzung erläutert und der Ablauf der Lehreinheit in übersichtlicher tabellarischer Form dargestellt (vgl. Kapitel 3.2.6). Darüber hinaus erfolgt ein Vergleich der Studie zugrunde liegenden Steuerungsmodi (vgl. Kapitel 3.2.7).

3.2.1 Fachliche Charakterisierung der Unterrichtsinhalte

Nach der Endosymbiontentheorie wird davon ausgegangen, dass sowohl Mitochondrien als auch Chloroplasten aus Prokaryonten hervorgegangen sind, die von größeren Zellen endozytiert wurden und dort überlebten. Es ist wahrscheinlich, dass die Prokaryonten entweder als unverdaute Beute oder als Endoparasiten in die Wirtszelle gelangten (Campbell et al., 2012, S. 692). Im Fall der Mitochondrien existieren über den Ursprung zwei konkurrierende Theorien. Bei der traditionellen Theorie wird davon ausgegangen, dass es sich bei der Wirtszelle um einen anaeroben Eukaryonten handelte, der einen mitochondrienähnlichen Einzeller via Phagozytose verschlingen konnte. Der Endosymbiont könnte dabei den modernen Rickettsia-Arten ähnlich gewesen sein. Sein anfänglicher Nutzen war es, Sauerstoff für den anaeroben Wirt zu entgiften (Martin & Mentel, 2010).

Bei der anderen Ursprungstheorie wird von einem Archaeobakterium (Prokaryot) als Wirt und einem fakultativen Anaerobier als Endosymbiont ausgegangen. Der symbiontische Nutzen könnte die Bereitstellung von H_2 als Energie- und Elektronenquelle für den H_2 -abhängigen Wirt gewesen sein (Martin & Mentel, 2010 und Roger et al., 2017). Im Fall der Chloroplasten sind sich Forschende einig, dass die Aufnahme eines Cyanobakteriums in eine protistische Wirtszelle erfolgte. Unklar ist jedoch, welche Cyanobakterien die nächsten Verwandten zu den heutigen Chloroplasten sind, wann dieser Vorgang genau stattgefunden hat und welche äußeren Bedingungen vorherrschten (Sánchez-Baracaldo et al., 2017). Während sich in nahezu allen Eukaryontenzellen Mitochondrien finden lassen, kommen Chloroplasten ausschließlich in Pflanzen- und Algenzellen vor (Alberts, 2014, S. 17–20). Die wesentliche

Aufgabe von Mitochondrien und Chloroplasten ist die Energiebereitstellung in Form von Adenosintriphosphat (ATP) in der Zelle. Während in Mitochondrien „Nährstoffe verbrannt werden, um daraus ATP durch oxidative Phosphorylierung zu gewinnen“ (Alberts et al., 2017, S. 853), betreiben Chloroplasten Photosynthese zur ATP-Herstellung.

Mitochondrien

Die äußere Form der Mitochondrien ist komplex und variiert je nach Zelltyp stark. Es sind nicht nur separate, bohnenförmige Formen anzutreffen, auch tubuläre und verzweigte Netzwerke sind möglich (Rafelski, 2013). Darüber hinaus sind Mitochondrien in der Lage, miteinander zu fusionieren und sich durch Fission wieder zu trennen (Alberts et al., 2017, S. 856; Jakobs et al., 2019, S. 4). Trotz dieser hohen Dynamik beträgt ihr Durchmesser etwa 0,5 bis 1 μm (Alberts et al., 2017, S. 856). Mitochondrien besitzen eine äußere und eine innere Membran, die aus einer Phospholipid-Doppelschicht und Membranproteinen aufgebaut sind (vgl. Abb. 8). Die Membranproteine der Außenmembran sind zum großen Teil Porine, die es Molekülen bis zu einer Größe von 5 kDa erlauben, frei zu diffundieren (Alberts, 2014, S. 489). Größere Moleküle müssen aktiv in den Intermembranraum (Raum zwischen Außen- und Innenmembran) transportiert werden.

Die Innenmembran, die den sog. Matrixraum umschließt, weist eine starke Faltung (Cristae) auf, die der Oberflächenvergrößerung dient. Im Gegensatz zur Außenmembran ist die Innenmembran für die meisten Moleküle und Ionen undurchlässig, sodass diese aktiv in die Matrix transportiert werden müssen. Entsprechend finden sich in der Membran zahlreiche Transportproteine, die Komponenten der Elektronentransportkette sind und Stoffe wie Pyruvat und Fettsäuren in den Matrixraum befördern (vgl. Abb. 9). Darüber hinaus finden sich in der Membran die für die ATP-Herstellung essenziellen Elektronenpumpen und ATP-Synthasen (Alberts, 2014, S. 489–490). Der Matrixraum ist durch eine hohe Konzentration an Proteinen von 500 mg ml^{-1} gekennzeichnet, die zum großen Teil der „Instandhaltung des genetischen Systems der Mitochondrien [dienen] und auch für viele andere essenzielle Reaktionen [...] benötigt werden“ (Alberts et al., 2017, S. 860). Zu dem genetischen System der Mitochondrien gehören die mitochondriale DNA, freie 70S-Ribosomen und tRNA. Zu den Hauptaufgaben der Matrixenzyme gehört die Umwandlung von Pyruvat und Fettsäuren zu Acetyl-CoA, um dieses im Zitronensäurezyklus weiter zu verstoffwechseln. Als Zwischenprodukt entsteht hierbei CO_2 , das aus dem Mitochondrium heraustransportiert wird. Zusätzlich wird NAD^+ zu NADH reduziert, sodass die energiereichen Elektronen an die Elektronentransportkette übertragen werden können. Diese Elektronen werden entlang der Elektronentransportkette auf O_2 übertragen, sodass einerseits H_2O entsteht und andererseits ein Protonengradient aufgebaut werden kann, der wiederum zum Antreiben der ATP-Synthase nötig ist, um ATP aus ADP herzustellen.

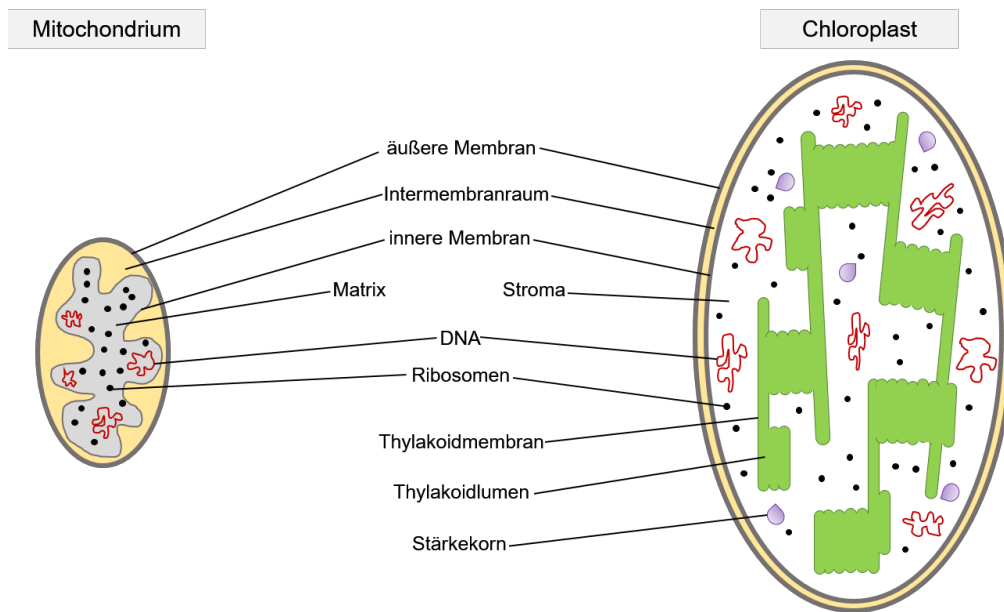


Abb. 8: Vergleich von Mitochondrium und Chloroplast (nach Alberts, 2014, S. 511).

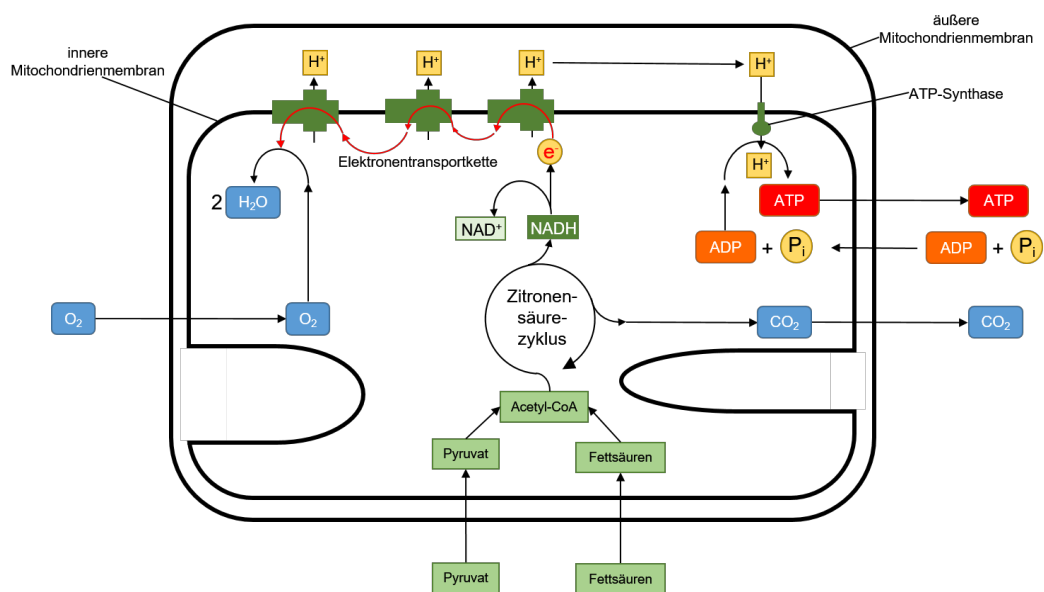


Abb. 9: Der Aufbau und die Energiegewinnung eines Mitochondriums (nach Alberts, 2014, S. 491).

Chloroplasten

Chloroplasten sind im Vergleich zu Mitochondrien mit einem Durchmesser von 2 bis 5 μm (Campbell et al., 2012, S. 152) deutlich größer, ähneln diesen allerdings in vielerlei Hinsicht im Aufbau und in der Plastizität (vgl. Abb. 8). Die Außenmembran von Chloroplasten besteht ebenfalls aus einer durchlässigen Phospholipid-Doppelschicht mit zahlreichen Proteinkanälen (Porinen). Die Innenmembran umschließt den Stromaraum (analog zur mitochondrialen Matrix) und ist deutlich weniger permeabel als die äußere Membran, sodass die meisten Stoffe aktiv ins Stroma der Chloroplasten transportiert werden müssen. Beide Membranen bilden mit dem dazwischenliegenden Intermembranraum die Chloroplastenhülle (Alberts, 2014, S. 510). Wie auch Mitochondrien besitzen Chloroplasten ein eigenes genetisches System, das im Stromaraum in Form von plastidärer DNA, 70S-Ribosomen und tRNA zu finden ist (Campbell et al., 2012, S. 152; Manuell et al., 2007). Darüber hinaus befinden sich im Stroma zahlreiche Enzyme, Stärkekörper und Plastoglobuli.

Anders als bei Mitochondrien ist die Elektronentransportkette nicht in der inneren Membran, sondern in der im Stroma befindlichen Thylakoidmembran verortet. Die Thylakoidmembran grenzt den Thylakoidraum vom Stroma ab und bildet ein eigenes Kompartiment. Sie besteht aus geldrollenartig gestapelten Granathylakoiden und den das Stroma durchziehenden Stromathylakoiden (Alberts et al., 2017, S. 886). Der grüne Farbstoff Chlorophyll ist besonders in den Granathylakoiden eingelagert.

Die Hauptaufgabe der Chloroplasten besteht in der Photosynthese, die in eine Licht- und eine Dunkelreaktion (vgl. Abb. 10) unterteilt werden kann. Im Vergleich zu den Mitochondrien erfolgt in Chloroplasten nicht nur die Energiebereitstellung für die Zelle, sondern auch die Kohlenstofffixierung mittels Calvin-Zyklus (Dunkelreaktion) (Campbell et al., 2012, S. 256–258). Während der Lichtreaktion (vgl. Abb. 11) im Photosystem II werden zunächst Lichtquanten von den Farbstoffmolekülen der Thylakoidmembran (z. B. Chlorophyll) aufgenommen und es kommt zur Anregung von Elektronen auf einen energetisch höherwertigen Zustand. Dabei werden 2 H_2O im Thylakoidlumen zu $\text{O}_2 + 4 \text{H}^+$ gespalten, wodurch die Protonenkonzentration im Thylakoidlumen zunimmt (Alberts, 2014, S. 515). Weitere Protonen gelangen mithilfe von Plastochinon und des Cytochrom-*b₆f*-Komplexes während des Q-Zyklus ins Thylakoidlumen (Tacchino et al., 2019). Der Protonengradient treibt eine ATP-Synthase an, die stromaseitig ADP zu ATP umwandelt. Im weiteren Verlauf der Elektronentransportkette über das Photosystem I und die Ferredoxin-NAPD-Reduktase wird $\text{NADP}^+ + \text{H}^+$ zu NADPH reduziert und gemeinsam mit dem ATP dem Calvin-Zyklus zugeführt (Campbell et al., 2012, S. 265). Im Calvin-Zyklus werden ATP und NADPH verbraucht, um CO_2 in Glucose bzw. Kohlenhydrate umzuwandeln (Alberts et al., 2017, S. 887–889). Der Calvin-

Zyklus wird zwar als *Dunkelreaktion* bezeichnet, ist jedoch indirekt auf Licht angewiesen, da zur Kohlenstofffixierung die Produkte der Lichtreaktion benötigt werden.

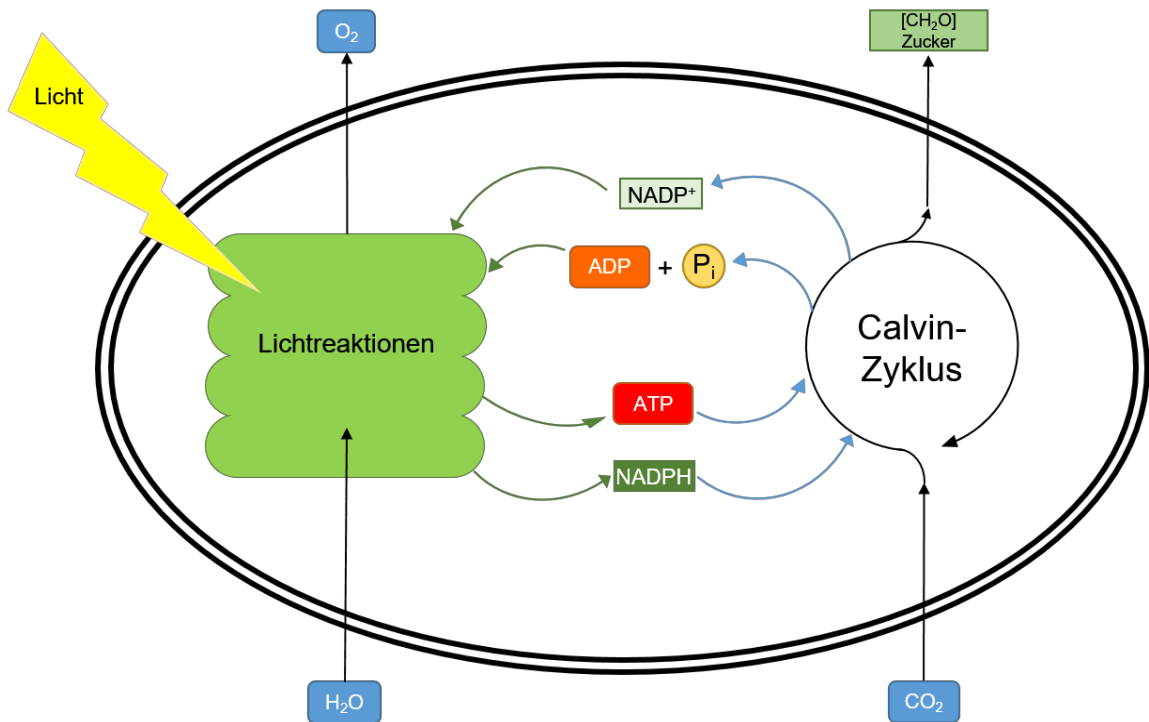


Abb. 10: Übersicht über die Photosynthese: Licht- und Dunkelreaktion (nach Campbell et al., 2012, S. 257).

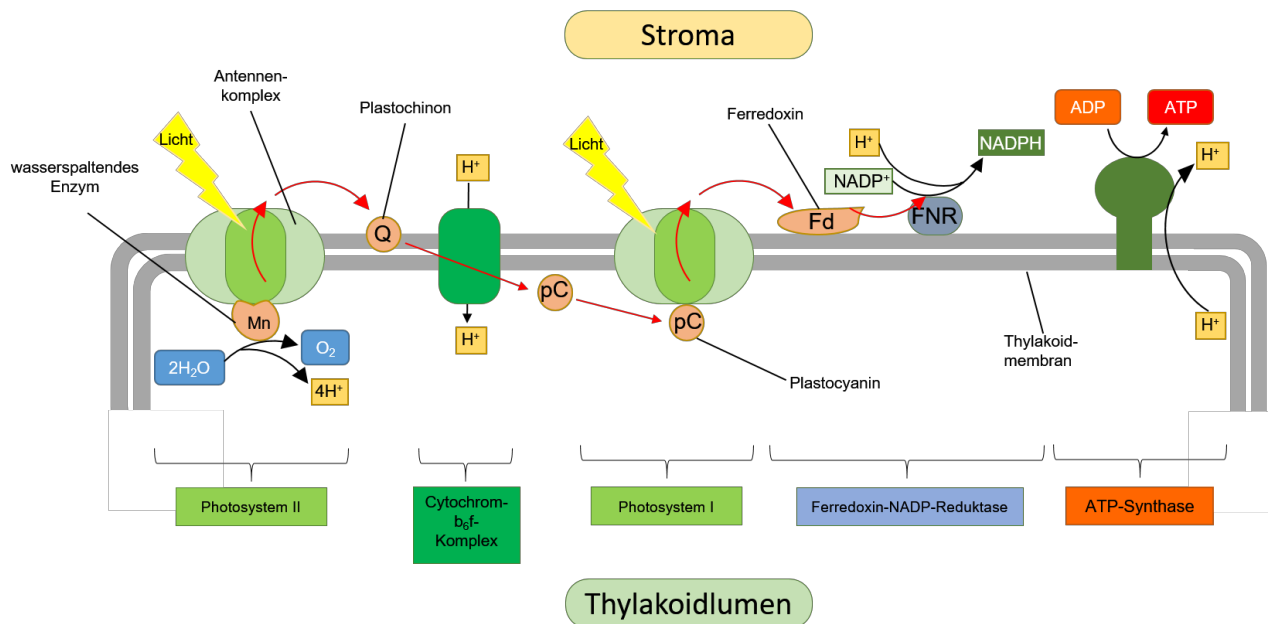


Abb. 11: Ablauf der Photosynthese an der Thylakoidmembran (nach Alberts, 2014, S. 515).

3.2.2 Lernziele und Kompetenzen

Entsprechend der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Vorgaben aus den Beschlüssen der Kultusministerkonferenz und einschlägiger fachdidaktischer Literatur werden für die vorliegende Unterrichtseinheit folgende Lernziele formuliert.

Die Schüler:innen sollen ...

1. den Aufbau von Mitochondrien beschreiben können (kognitiv).
2. den Aufbau von Chloroplasten beschreiben können (kognitiv).
3. Unterschiede und Gemeinsamkeiten von Mitochondrien und Chloroplasten benennen können (kognitiv).

Darüber hinaus werden im Rahmen der digitalen Kompetenzbildung Schwerpunkte auf die Kompetenzbereiche *Kommunizieren und Kooperieren* (digitale Werkzeuge für die Zusammenarbeit bei der Zusammenführung von Informationen, Daten und Ressourcen nutzen) sowie *Problemlösen und Handeln* (eine Vielzahl von digitalen Werkzeugen kennen und kreativ anwenden) gelegt (KMK, 2016).

3.2.3 Fachdidaktische Begründung der Stoffauswahl

Die geplante Unterrichtseinheit leitet sich aus dem in den *Lehrplänen für naturwissenschaftliche Fächer* vorgegebenen Themenfeld 8: „Sport und Ernährung – Energiebilanz des Körpers“ ab (MWWK, 2014, S. 38–39), in dem u. a. die Inhalte Zellatmung und Energieträger (ATP) behandelt werden. Darüber hinaus „bietet das Themenfeld einen ersten Zugang zu molekularbiologischen Fragestellungen“ (MWWK, 2014, S. 39). Dabei kann auf dem Vorwissen aus Themenfeld 3: „Organismus, Organe, Zellen – Versorgung mit Stoffen und Energie“ (MWWK, 2014, S. 28–29) und aus Themenfeld 4: „Pflanze, Pflanzenorgane, Pflanzenzellen – Licht ermöglicht Stoffaufbau“ (MWWK, 2014, S. 30–31) aufgebaut werden. Die Lernenden sollten bereits mit dem Aufbau einer tierischen und einer pflanzlichen Zelle, mit dem Prinzip der Zellatmung, mit der Photosynthesereaktion (Kohlenstoffdioxid, Wasser, Glucose, Sauerstoff) sowie mit den Begriffen *Chloroplast* und *Chlorophyll* vertraut sein.

In dem Lehrplan Biologie für die Sekundarstufe II lässt sich die Unterrichtseinheit im Leitthema 2: „Stoffwechsel & Energiefluss lebender Systeme“ (MWWK, 1998, S. 82) verorten. In dem zugehörigen Pflichtbaustein *Gärung und Atmung* werden der Feinbau von Mitochondrien, die oxidative Decarboxylierung, der Citratzyklus, die chemiosmotische Theorie, der Vergleich mit der Thylakoidmembran und die Endosymbiontentheorie ausführlich thematisiert. Weiterhin werden in dem Pflichtbaustein *Photosynthese* der Feinbau von Chloroplasten sowie lichtabhängige und lichtunabhängige Reaktionen behandelt (MWWK, 1998, S. 83). Die Einordnung in Leitthema 6 „Entstehung & Veränderung lebender Systeme“ ist besonders als

Hinführung zur Endosymbiontentheorie (Pflichtbaustein: Erdgeschichte und Geschichte des Lebens) möglich (MWWK, 1998, S. 107).

Wie bereits in Kapitel 3.1.3 ausführlich dargelegt, wurden zur Auswahl der Unterrichtsinhalte und zur Unterrichtsplanung die von Klafki (1964) beschriebenen fünf Grundfragen herangezogen. Darüber hinaus mussten die organisatorisch-methodischen Bedingungen der Studie berücksichtigt und mit der didaktischen Planung in Einklang gebracht werden.

Gegenwarts- und Zukunftsbedeutung

Der Aufbau von tierischen und pflanzlichen Zellen inklusive der zugehörigen Organellen gehört zum elementaren Grundwissen, um Zellmechanismen zu verstehen und ein konzeptuelles biologisches Verständnis zu entwickeln. Dieses Wissen lässt sich auf weitere biologische Fragestellungen und Alltagsphänomene übertragen, indem die Schüler:innen gemäß des Basiskonzepts *Struktur und Funktion* Erklärungen und Hypothesen liefern können. Gerade für Schüler:innen, die eine berufliche Zukunft in der Biologie oder der Medizin anstreben, ist dieser Unterrichtsbestandteil elementar.

Exemplarik

Tierische und pflanzliche Zellen lassen sich durch die Biomembranen ihrer Zellorganellen in verschiedene Kompartimente gliedern. Diese Kompartimente bilden eigene, hochspezialisierte Reaktionsräume, in denen Stoffwechselfvorgänge und biochemische Reaktionen ablaufen. Die Kompartimentierung ist nicht auf die Zellebene beschränkt, sondern lässt sich auch auf Zellorganellebene fortführen. Damit bilden Mitochondrien und Chloroplasten ihrerseits eigene Reaktionsräume (Intermembranraum, Stroma, Matrix, Thylakoidlumen). Der kompartimentäre Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten lässt sich exemplarisch auf andere von Membranen umschlossene Zellorganellen übertragen. Damit wird es Lernenden ermöglicht, ihr Wissen über den Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten auf andere Strukturen zu beziehen und so Rückschlüsse auf bestimmte Funktionen zu ermöglichen. Darüber hinaus können die neu gewonnenen Erkenntnisse zum Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten im Kontext der Endosymbiontentheorie wieder aufgegriffen werden und somit den Erkenntnisprozess erleichtern.

Zugänglichkeit

Da die Lernenden bereits mit dem Aufbau einer Pflanzenzelle vertraut sind, kann dieses Vorwissen zum Einstieg in die Unterrichtseinheit reaktiviert und genutzt werden, um zum Unterrichtsthema *Der Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten* hinzuführen. Da den Lernenden bereits bewusst ist, dass im Rahmen der Studie eine Tablet-basierte AR-App eingesetzt wird, wird sowohl Interesse geweckt als auch die intrinsische Motivation gefördert. Bei einigen Schüler:innen kann zudem das Vorhandensein von Mitochondrien in der

Pflanzenzelle zu einem kognitiven Konflikt führen, da in Pflanzenzellen gemeinhin die Chloroplasten als energieliefernde Zellorganellen angesehen werden und Mitochondrien in der schulischen Praxis meist im humanbiologischen Kontext (siehe „TF 8: Sport & Ernährung – Energiebilanz des Körpers (MWWK, 2014, S. 38–39)“) unterrichtet werden. Dieser kognitive Konflikt kann nach Berck und Graf (2010) zu einer Steigerung der Lernmotivation führen.

Struktur des Inhalts

Der Schwerpunkt der Unterrichtsstunde liegt auf dem Aufbau der Mitochondrien und Chloroplasten. Die strukturellen Eigenschaften sollen das Grundlagenwissen für folgende Unterrichtseinheiten bilden, in denen die Funktionsweise ausgewählter Stoffwechselvorgänge thematisiert wird. Aufgrund des ähnlichen Aufbaus lassen sich bestimmte Mechanismen (z. B. Elektronentransportkette, Protonengradient, ATP-Synthese) durch Transferwissen von einem Zellorganell auf das andere übertragen. Der Einstieg über ein elektronenmikroskopisches Bild einer Pflanzenzelle und die Benennung einzelner Organellen dient als Wiederholung und gibt einen Überblick über den Aufbau einer Pflanzenzelle. Dabei werden die Größenverhältnisse der Zellorganellen zur Gesamtzelle und zueinander deutlich.

Der inhaltliche Schwerpunkt der Erarbeitungsphase liegt auf der Benennung und Verortung bestimmter Zellorganellstrukturen (Membranen, Kompartimente, Ribosomen, ATP-Synthase, DNA etc.), sodass ein späterer Vergleich beider Organellen hinsichtlich des Aufbaus möglich wird. Der molekulare Aufbau einzelner Strukturen spielt an dieser Stelle nur eine untergeordnete Rolle und sollte den Stoffwechselvorgängen entlang der Membranen (Photosynthese, Elektronentransportkette, Calvin-Zyklus etc.) thematisch vorgelagert sein. Als Alternative bietet sich die Unterrichtsstunde zur Vorbereitung auf die Endosymbiontentheorie an. Das Unterrichtsverfahren könnte hierbei dem logisch-genetischen Erkenntnisweg (Killermann et al., 2011, S. 46) folgen, in dem die Lernenden Hypothesen über den Ursprung von Mitochondrien und Chloroplasten aufstellen, durch den Aufbau und das Vorhandensein bestimmter Zellstrukturen (70S-Ribosomen, DNA, Ribosomen, Membranen) diese Hypothesen beantworten und eine Theorie ableiten.

3.2.4 Methodische Überlegungen

Wie bereits in Kapitel 3.1.4 beschrieben, muss auch bei der methodischen Planung der Unterrichtseinheit eine genaue Abwägung zwischen den Studienbedingungen und der unterrichtlichen Umsetzung erfolgen. Dabei gilt es, die Gütekriterien für wissenschaftliche Arbeiten zu wahren, ohne die wesentlichen Prinzipien zur Unterrichtsgestaltung zu vernachlässigen.

Der Einstieg in die Stunde erfolgt mithilfe eines mikroskopischen Bilds einer pflanzlichen Zelle. Diese wird den Schüler:innen auf einer PowerPoint-Folie (vgl. Anhang 1.2.1, S. A88 f.) auf der

Projektionsfläche präsentiert. Die Schüler:innen erhalten von der Lehrkraft den mündlichen Arbeitsauftrag, ihnen bekannte Zellstrukturen zu benennen. Mithilfe eines Laserpointers sind die Schüler:innen angehalten, die von ihnen benannten Zellorganellen zu markieren. Dieses Vorgehen ist zum einen der Aktivierung zuträglich und zum anderen lassen sich Antworten der Schüler:innen überprüfen und ggf. korrigieren. Um die effektive Lernzeit zu erhöhen, wird der Laserpointer den jeweiligen Schüler:innen von der Lehrkraft überreicht. Sollten nicht alle Zellorganellen identifiziert werden können oder die Schüler:innen Hilfestellungen benötigen, kann eine deckungsgleiche, semitransparente Schemazeichnung auf das mikroskopische Bild eingeblendet werden, wodurch die einzelnen Zellstrukturen farblich hervorgehoben werden.

Nachdem alle wesentlichen Strukturen identifiziert wurden, werden auf der PowerPoint-Folie alle Zellbestandteile mit Ausnahme der Mitochondrien und Chloroplasten ausgeblendet und es wird zum Thema der Stunde übergeleitet. Der methodische Schwerpunkt der Unterrichtsstunde liegt in der Förderung digitaler Kompetenzen (vgl. Kapitel 3.2.2). Daher folgt eine kurze Vorstellung der Unterrichtsmaterialien, der AR-App sowie der beiden Steuerungsmodi (vgl. Kapitel 3.2.7, 5.2). In der darauffolgenden Erarbeitungsphase erhalten alle Schüler:innen ein Tablet, sodass die Aufgaben eigenständig bearbeitet werden können. Da die Stärken digitaler Medien u. a. im paarweisen Austausch miteinander liegen (Hillmayr et al., 2017, S. 14), können die Aufgaben auch in Partnerarbeit gelöst werden.

Die Schüler:innen füllen mithilfe der AR-App den Lückentext zum Aufbau von Chloroplasten (Aufgabe 1) und von Mitochondrien (Aufgabe 2) aus (vgl. Anhang 1.2.2, S. A95 f.). Innerhalb der App können sie beliebig die Beschriftungen am 3D-Modell des Mitochondriums bzw. des Chloroplasten ein- und ausschalten, wodurch ihnen selbstständiges Arbeiten ermöglicht wird und der Unterrichtsgegenstand in individuellem Lerntempo bearbeitet werden kann. Aufgrund des Studiendesigns dürfen während der Bearbeitung der Aufgaben nur organisatorische Hinweise gegeben werden, sodass die Ergebnisse nicht durch die Lehrkraft beeinflusst werden.

Die Sicherung erfolgt ähnlich wie der Einstieg im Klassenverbund mithilfe von PowerPoint-Folien und Laserpointer. Auf der Projektionsfläche werden nacheinander schematische Abbildungen eines Chloroplasten und eines Mitochondriums mit nummerierten Feldern präsentiert. Die Schüler:innen benennen die markierten Strukturen, während die Lehrkraft diese bei korrekter Benennung auf der Folie einblendet.

3.2.5 Voraussetzungen zur unterrichtlichen Umsetzung

Die Unterrichtseinheit umfasst aufgrund der zugehörigen Befragungen und Tests den zeitlichen Rahmen einer Doppelstunde (2 x 45 Minuten). Zur Durchführung ohne begleitende Datenerfassung reduziert sich die Zeit entsprechend auf 45 Minuten. Da die Lernenden die Aufgaben individuell (paarweiser Erfahrungsaustausch ist gestattet) bearbeiten und keine Gruppenarbeit vorgesehen ist, kann die bestehende Sitzordnung beibehalten werden. Während sämtliches Unterrichtsmaterial (inkl. Tablets) von der Lehrkraft bzw. dem Studienleiter vorbereitet und zur Verfügung gestellt wird, sollte die Räumlichkeit über einen Beamer und eine entsprechende Projektionsfläche verfügen. Sollte entsprechend der Schulvorgaben zwischen der Doppelstunde eine Pause vorgesehen sein, wird diese in Absprache mit den Lernenden am Ende der Doppelstunde nachgeholt, sodass der Lernfluss nicht unterbrochen wird.

3.2.6 Ablauf der Lehreinheit

In diesem Kapitel wird der Verlauf Unterrichtseinheiten der *Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten* mithilfe von Tab. 5 dargestellt, sodass die unterrichtlichen Schritte nachvollzogen werden können.

Tab. 5: Verlaufsplan der Unterrichtseinheit *Der Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten*.

Phase	Inhaltliche Schwerpunkte/Operationen	Sozial- und Aktionsform	Medien
Einführung	<ul style="list-style-type: none"> - Vorstellung Person und Projekt - Anknüpfung an Vorerfahrungen (AR) - Gruppeneinteilung und Vergabe von Kennung - Organisatorisches 	LV	PowerPoint-Folien, Gruppenkarten mit Kennung (Anhang 1.2.1, S. A88 f.)
Erhebung	Durchführung Pre-Test	EA	Tablet mit Pre-Test (Anhang 2.3.1, S. A146 f.)
Einstieg	<ul style="list-style-type: none"> - PowerPoint-Folie mit mikroskopischem Bild einer Pflanzenzelle - Zellstrukturen benennen und verorten - Schwerpunktsetzung auf Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten - Besprechung des Ablaufs und der Unterrichtsmaterialien 	LV UG	Beamer, Projektionsfläche, PowerPoint-Folie Arbeitsblatt (Lückentext) (Anhang 1.2.2, S. A95 f.) Trigger-Karten (Anhang 1.2.3, S. A98 f.)

Fortsetzung Tab. 5

Erarbeitung	- Eigenständige Bearbeitung der Aufgaben auf Arbeitsblatt 1. Lückentext Chloroplast a. Datenerhebung 2. Lückentext Mitochondrium a. Datenerhebung	EA/PA	Tablet (inkl. AR-App und Umfrage) Arbeitsblatt Trigger-Karten
Erhebung	- Durchführung Post-Test - Abschlussbefragung	EA	Tablet mit Post-Test und Umfrage (Anhang 2.3.1, S. A146 f.; Anhang 2.1.6, S. A125 f.)
Sicherung	Besprechung der Aufgaben	UG	PowerPoint-Folien
LV – Lehrvortrag; UG – Unterrichtsgespräch; EA – Einzelarbeit; PA – Partnerarbeit			

3.2.7 Vergleich der Steuerungsmodi: Augmented Reality vs. Gestensteuerung

Im Rahmen der empirischen Detailstudie wird der Frage nachgegangen, welchen Einfluss die Steuerungsmechanismen AR-Steuerung und Touch-Gestensteuerung auf die Benutzerfreundlichkeit, den CL und den LZ haben. Grundlegend unterscheiden sich beide Steuerungsmöglichkeiten in ihrer Interaktivität mit der Realität und in der Änderung der perspektivischen Betrachtung der 3D-Modelle. Bei der AR-Steuerung wird das 3D-Modell auf eine etwa handtellergröße Abbildung auf Pappkarton (Trigger) (vgl. Anhang 1.2.3, S. A98 f.) projiziert, sodass eine Perspektivenänderung durch die relativen Winkel zwischen Tablet und Trigger erfolgt. Durch Veränderung des Abstands zwischen Tablet und Trigger vergrößert bzw. verkleinert sich die Darstellung auf dem Tablet. Die Touch-Gestensteuerung kommt hingegen ohne Trigger aus, sodass eine Rotation und Skalierung des 3D-Modells mithilfe von Fingergesten auf dem Display möglich ist. Um eine mögliche Fehlerquelle für die Studie auszuschließen, sind die dargestellten Informationen und Interaktionsmöglichkeiten identisch, sodass der alleinige Unterschied auf den Steuerungsmechanismen beruht. Eine detaillierte Beschreibung beider LS erfolgt in Kapitel 5.8.

4 Hypothesen

Die vorliegende Arbeit widmet sich dem Lernen mit AR in authentischen biologischen Unterrichtsszenarien. Aufgrund der Komplexität des Mediums wurden einzelne AR-Merkmale ausgewählt (vgl. Abb. 2, S. 9) und den Studien zugrunde gelegt, sodass diese, im Rahmen exemplarischer Unterrichtsmodule für die Sekundarstufen I und II an Gymnasien, erforscht werden konnten (siehe Überblick in Tab. 6). Darüber hinaus wurden durch eine universitätsübergreifende Detailstudie weitere Forschungsfelder aufgezeigt. Um die lernwirksamen Potenziale von AR-basierten Lernumgebungen identifizieren und beschreiben zu können, wurden Daten zum LZ, zum CL, zur UX, zur ELU und – im Fall der Detailstudie – zur Immersion herangezogen und in Bezug zueinander gesetzt. Diesbezügliche Zusammenhänge leiten sich aus den in Kapitel 2 beschriebenen theoretischen Grundlagen ab. Ob sich diese Zusammenhänge auch praktisch nachweisen lassen, soll über die folgende Fragestellung studienübergreifend beantwortet werden:

FF1 Welche theoretischen Zusammenhänge (Kapitel 2) zwischen den Variablen der unterschiedlichen Testinstrumente lassen sich bestätigen?

- FF1 H1 Je höher der ICL, desto höher ist auch der ECL.
- FF1 H2 Je höher der ICL, desto höher ist der (erforderliche) GCL.
- FF1 H3 Je höher der ECL, desto niedriger ist der GCL.
- FF1 H4 Je höher der GCL, desto höher ist der LZ.
- FF1 H5 Je höher der ICL, desto niedriger ist der LZ.
- FF1 H6 Je höher der ECL, desto niedriger ist der LZ.
- FF1 H7 Je besser die UX, desto niedriger ist der ECL.
- FF1 H8 Je besser die UX, desto höher ist der GCL.
- FF1 H9 Je höher die ELU, desto niedriger ist der ECL.
- FF1 H10 Je höher die ELU, desto höher ist der GCL.
- FF1 H11 Je höher die Immersion, desto höher ist der LZ.

Tab. 6: Übersichtsdarstellung der einzelnen Studien. Fragestellung, erhobene Daten und Stichprobe.

Studie	Alzheimerkoffer	Mitochondrien und Chloroplasten	HoloBrain
Fragestellung	Einfluss des Mediums (AR vs. EUM)	Einfluss der Steuerung (AR vs. Gestensteuerung)	Einfluss der Triggerart (3D-QR-Cube vs. 2D-Gehirnscheibe) Einfluss des Mediums (AR- vs. Papiermodell)
Erhobene Parameter	LZ CL UX ELU	LZ CL UX ELU	LZ CL Immersion
Stichprobe	Sek I und Sek II	Sek II	Studierende

4.1 Studie: Alzheimerkoffer

Die Studie *Alzheimerkoffer* basiert auf der gleichnamigen Lehrmittelsammlung, die „das Produkt einer interdisziplinären Zusammenarbeit eines Teams aus Schule und Universität [ist]. Gemeinsam wurden Unterrichtsmodulare sowie umfangreiche Material-Sammlungen entwickelt, um aktuelle Forschung zu einem gesellschaftlich relevanten Thema in die Schule zu bringen.“ (Hoffmann, 2021, o. S.) Auf Grundlage der bereits existierenden Unterrichtsmodulare, die mehrfach praktisch erprobt wurden und Teil bundesweit evaluierter Fortbildungen für Lehrkräfte sind, wurden zwei Unterrichtseinheiten zum Aufbau und zur Funktion des menschlichen Gehirns und zur Pathologie der Alzheimer-Demenz für die Sekundarstufen I und II konzipiert. Um den Einfluss des eingesetzten Mediums auf die Lernwirksamkeit untersuchen zu können, wurde eigens für die Studie die *Alzheimer-AR-App* entwickelt und im Apple App-Store veröffentlicht. Durch die bereits existierende mediale Umsetzung mithilfe von EUM und die neu entwickelte Alzheimer-AR-App ergibt sich die Fragestellung:

FF2 Welchen Einfluss hat die Art des Mediums (AR oder EUM) auf die Lernwirksamkeit?

Folgende Hypothesen wurden der Untersuchung zugrunde gelegt:

Die Nutzung von AR zur Aufgabenbearbeitung führt im Vergleich zu EUM ...

- FF2 H1 ... zu einem höheren LZ.
- FF2 H2 ... zu einem niedrigeren CL.
- FF2 H3 ... zu einem gleichen ICL.
- FF2 H4 ... zu einem niedrigeren ECL.
- FF2 H5 ... zu einem höheren GCL.

- FF2 H6 ... zu einer besseren UX.
- FF2 H7 ... zu einer höheren ELU.

4.2 Studie: Mitochondrien und Chloroplasten

Augmented Reality bietet im Vergleich zu bisherigen Technologien neue Möglichkeiten der Mensch-Computer-Interaktion zur Steuerung digitaler Inhalte (vgl. Kapitel 2.4.). Die vorherrschende Bedienung von Smartphones und Tablets basiert auf Touch-Gestensteuerung, wodurch das Display nicht nur ein Ausgabe-, sondern auch ein Eingabeelement darstellt. Eingaben wie die *Pinch-to-Zoom-Geste*, die gerne zum Heranzoomen von Fotos oder mobilen Webseiten genutzt wird, wirken zwar natürlich, sie sind aber erlernte Steuerungselemente, die abseits der Bedienung digitaler Endgeräte in der Realität nicht vorhanden sind.

Eine natürlichere Art der Steuerung lässt sich mithilfe von AR realisieren, da sich – wie in der Realität – ein digitales Objekt auf dem Display durch die räumliche Distanz zum realen Objekt (Trigger) beliebig skalieren lässt. Entsprechend der verschiedenen Benutzungsschnittstellen werden Unterschiede hinsichtlich der UX erwartet, die sich auch auf die Lernwirksamkeit der Steuerungsarten niederschlagen können. Dementsprechend liegt der Fokus der Studie *Mitochondrien und Chloroplasten* auf der Fragestellung:

FF3 Welchen Einfluss hat die Art der Steuerung (AR- oder Touch-Gestensteuerung) auf die Lernwirksamkeit?

Folgende Hypothesen wurden der Untersuchung zugrunde gelegt:

Die Nutzung der AR-Steuerung zur Aufgabenbearbeitung führt im Vergleich zur Touch-Gestensteuerung ...

- FF3 H1 ... zu einem höheren LZ.
- FF3 H2 ... zu einem niedrigeren CL.
- FF3 H3 ... zu einem gleichen ICL.
- FF3 H4 ... zu einem niedrigeren ECL.
- FF3 H5 ... zu einem höheren GCL.
- FF3 H6 ... zu einer besseren UX.
- FF3 H7 ... zu einer höheren ELU.

4.3 Detailstudie: HoloBrain

Die Detailstudie ist im Rahmen eines universitätsübergreifenden Projekts mit der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg entstanden und untersucht mithilfe der Immersion weitere Potenziale von AR-basierten Lernumgebungen. Da sich AR-Lernumgebungen nicht nur im Digitalen durch die mediale Darstellung unterscheiden, sondern auch im Realen durch den Einsatz unterschiedlicher Trigger (vgl. Kapitel 2.1.1), stellt sich die Fragestellung:

FF4 Welchen Einfluss hat die Art des Triggers (3D-QR-Cube oder 2D-Gehirnscheibe) auf die Lernwirksamkeit?

Weil es sich bei den digitalen Inhalten um eine dreidimensionale Darstellung des menschlichen Gehirns handelt, ist davon auszugehen, dass ein ebenfalls dreidimensionaler Trigger (3D-QR-Cube) zu einer höheren Immersion und dadurch zu einer höheren Lernwirksamkeit führt. Dementsprechend liegen der Studie folgende Hypothesen zugrunde:

Die Nutzung des 3D-QR-Cube zur Aufgabenbearbeitung führt im Vergleich zur 2D-Gehirnscheibe als Trigger ...

- FF4 H1 ... zu einem höheren LZ.
- FF4 H2 ... zu einem gleichen ICL.
- FF4 H3 ... zu einem niedrigeren ECL.
- FF4 H4 ... zu einem höheren GCL.
- FF4 H5 ... zu einer besseren UX.
- FF4 H6 ... zu einer höheren Immersion.

Um in einer analogen Unterrichtspraxis eine vergleichbare Situation hinsichtlich der Verfügbarkeit von haptischen Modellen zu erreichen, bieten sich Papiermodelle des menschlichen Gehirns an, die selbst hergestellt werden können. Daher wird ebenfalls folgende Fragestellung zugrunde gelegt:

FF5 Welchen Einfluss hat die mediale Repräsentation (AR-Hirnmodell oder Papiermodell) auf die Lernwirksamkeit?

Begünstigt durch den Novelty-Effect (z. B. Hopp & Gangadharbatla, 2016) der AR Lernumgebung werden folgende Hypothesen formuliert:

Der Einsatz des AR-Hirnmodells führt im Vergleich zu dem des Papiermodells ...

- FF5 H1 zu einer höheren Immersion.
- FF5 H2 zu keinen Unterschieden beim ICL.
- FF5 H3 zu einem niedrigeren ECL.
- FF5 H4 zu einem höheren GCL.
- FF5 H5 zu einer besseren UX.

5 Material und Methoden

5.1 Entwicklung des Grundkonzepts für Augmented-Reality-Apps

Auf Grundlage der in Kapitel 2 beschriebenen theoretischen Grundlagen der Studien und der anfänglichen praktischen Erfahrungen zum Einsatz von AR in Lehr-Lern-Szenarien galt es, ein Grundkonzept für die empirischen Studien zu entwickeln. Obwohl es derzeit eine Fülle – und stetig steigende Zahl – an AR-Anwendungen für den Unterrichtseinsatz gibt, offenbaren diese gerade vor dem Hintergrund der Erforschung der CLT und der Konstruktion eines Kontrollansatzes Defizite. Entsprechend der CLT steigt der ECL, wenn das Lehrmaterial ablenkende, sich wiederholende, verwirrende oder unnötige Informationen enthält. Kommerzielle AR-Apps bringen abseits der ggf. anfallenden Kosten entsprechende Nachteile durch In-App-Käufe, Werbeanzeigen, Informationen in englischer Sprache, Registrierungszwang, eine undurchsichtige Menüstruktur und die Darstellung fachlich falscher oder irrelevanter Informationen mit sich. An dieser Stelle ist anzumerken, dass auch EUM von dieser Problematik nicht vollkommen befreit sind, sodass Lehrkräfte stets mit der Aufgabe konfrontiert sind, verfügbare Unterrichtsmedien für ihren Unterricht anzupassen und aufzubereiten. Aus diesen Gründen und wegen der Möglichkeit, die AR-Lernumgebungen nach den Ergebnissen aus Vorstudien anzupassen, wurde entschieden, eigene AR-Apps zu entwickeln.

Die AR-Apps wurden mithilfe des Vuforia-SDK in Kombination mit der (Spiele-)Entwicklungsumgebung Unity3D realisiert, da dieses Vorgehen zum Zeitpunkt des Studienbeginns eine Vielzahl verschiedener AR-Anwendungsmöglichkeiten in Verbindung mit stabilen Trackingeigenschaften bot. Es wurde für jede Studie eine eigenständige App programmiert. Im Fall der Studie zum Alzheimerkoffer wurden eine öffentlich zugängliche Version (*Alzheimer AR*) sowie eine auf das Studiendesign angepasste Version (*Gehirn AR*) entwickelt. Letztere erleichtert die Navigation durch die Begleitmaterialien und greift dem Inhalt der Unterrichtseinheit durch den Namen nicht vor. Die übrigen Apps entsprechen der Nomenklatur der dazugehörigen Studie. Bei der Planung und Gestaltung der AR-Apps musste eine Vielzahl an Faktoren berücksichtigt werden, um den Anforderungen der Studie zu genügen:

Lernziele definieren Inhalt

Sämtliche in den AR-Apps dargestellten Informationen werden durch zuvor festgelegte Lernziele (vgl. Kapitel 3.1.2, 3.2.2) definiert. Gleiches gilt für die mediale Gestaltung der Kontrollgruppe. Um eine Erhöhung des ECL zu verhindern, sollte auf redundante und unnütze Informationen verzichtet werden.

Menü und User-Interface

Das UI bildet die Schnittstelle zwischen Mensch und Anwendung und ist damit einhergehend ein essenzieller Faktor der UX. Ausschlaggebend hierfür sind die Bedürfnisse und die Vorkenntnisse der Nutzenden bzw. der Zielgruppe sowie die technisch-gestalterische Umsetzung. Wird das Menü der App als Teil des UI begriffen, lässt sich dieses in zwei Kategorien aufteilen: die Menüstruktur und das Menüdesign. Die Menüstruktur legt die Steuerung durch die Anwendung im Sinne eines Organigramms fest. Dabei gilt: Je mehr Untermenüs und Interaktionsmöglichkeiten die App bietet, desto komplexer und undurchsichtiger ist die Anwendung. Ob dies jedoch negative Auswirkungen auf die UX hat, entscheidet sich erst durch die Fähigkeiten und Bedürfnisse der Nutzenden. Sind diese bspw. mit der Menüstruktur von Microsoft Word vertraut, wird es ihnen leichter fallen, sich in der Menüstruktur anderer Anwendungen des Microsoft-Office-Pakets zurechtzufinden.

Das Menüdesign hingegen umfasst die gestalterische Komponente des Menüs. Dazu zählen bspw. das Wireframe (Platzierung der Elemente wie Buttons, Symbole, Text, Abbildungen, Links), die Farbgebung und die Gestaltung der Elemente. Aufgrund der Studien-Zielgruppe (heterogene Vorerfahrungen mit digitalen Anwendungen) und der bisherigen Erkenntnisse aus der CLT (hohe Elementinteraktivität führt zu höherem ECL) muss bei der Konzeption des App-Menüs auf eine einfache, nicht verschachtelte Struktur sowie auf ein verständliches und klares Elementdesign geachtet werden, wobei die bisherigen Nutzungserfahrungen berücksichtigt werden. In Kapitel 5.2 wird die Umsetzung des UI-/UX-Designs der einzelnen Apps detailliert erläutert.

Auswahl geeigneter Trigger

Bei der Konzeption der AR-Lernumgebungen wurde der Marker-based-AR-Ansatz gewählt (vgl. Kapitel 2.1.1). Hierbei erkennt die Software eine zuvor definierte Abbildung, ein 2D-Objekt oder ein Multi-Target als Trigger und startet die Projektion der hinterlegten digitalen Informationen. Durch die ortsgenaue Positionierung und das Tracking ist es möglich, den Trigger beliebig im Raum zu bewegen, sodass die Relation zu den digitalen Inhalten in Echtzeit neu berechnet und aufrechterhalten wird. Der Marker-based-AR-Ansatz bietet stabiles Tracking, eine fixe Skalierung der 3D-Objekte, eine starke Einbindung der Realität sowie erweiterte Interaktions- bzw. Steuerungsmechanismen. Der Trigger sollte die in Kapitel 2.1.1

beschriebenen Kriterien erfüllen, damit er von der Software verarbeitet werden kann. Sofern Realobjekte wie biologische Modelle, Abbildungen oder Arbeitsblätter diese Kriterien erfüllen, lassen sich diese beliebig digital erweitern. Ist dies nicht der Fall, muss nach kreativen Lösungen gesucht werden. Im konkreten Fall des Gehirnmodells wurde bspw. das physische Modell auf einer *Triggerplatte* fixiert und die 3D-Information in Relation zur Triggerplatte positioniert, sodass die 3D-Informationen deckungsgleich mit dem physischen Modell sind und eine Betrachtung von allen Seiten möglich wird. Diese *echte* Erweiterung des Realobjekts ist durch die kausale Verbindung zwischen der Realität und der Virtualität gekennzeichnet.

Im Gegensatz zur Marker-based AR tritt eine weitere Technik verstärkt in den Fokus der Entwicklung: das sogenannte World Tracking (ARKit) bzw. Plane Detection (ARCore) oder auch Ground Plane (Vuforia). Es ermöglicht die Projektion virtueller Objekte auf glatte Oberflächen (Tisch- und Arbeitsplatte, Boden, Wand). Auch wenn dies im Vergleich zur Marker-based AR den Vorteil bietet, dass kein bestimmtes Realobjekt mehr zur Nutzung vorhanden sein muss und die AR jederzeit und fast überall gestartet werden kann, findet sich nur selten eine echte Verknüpfung zwischen Realität und Virtualität, da 3D-Objekte meist ohne Sinnzusammenhang im Raum positioniert werden.

Eine Ausnahme hiervon stellen Szenarien dar, in denen sich der Sinnzusammenhang erst durch die Positionierung ergibt, bspw. bei einer Einrichtungs-AR-App, bei der digitale Möbelstücke mittels AR in der Wohnung platziert werden können. Ein weiteres Defizit kann darin bestehen, dass die Skalierung durch die Nutzenden festgelegt wird, was gerade in anatomischen Kontexten, wenn es um die Erfahrung der realen Größen geht, zu Fehlvorstellungen führen kann. Soll bspw. das menschliche Herz mit dem Herzen eines Blauwals verglichen werden, ist die Wiedergabe des exakten Verhältnisses entscheidend. Des Weiteren ist die Steuerungsmöglichkeit eingeschränkt, sodass eine 360°-Betrachtung nur möglich wird, indem das Tablet um das 3D-Objekt bewegt wird oder das 3D-Objekt mittels Touch-Gestensteuerung rotiert wird. Im Gegensatz dazu erscheint die Steuerung der Marker-based AR natürlicher und intuitiver, da die Betrachtung aller Seiten des 3D-Objekts sowohl mittels Trigger-Rotation als auch durch Bewegung des Tablets (AR-Steuerung) möglich ist.

Kontrollgruppendesign

Aussagen über die Effekte von digitalen Medien im Schulunterricht lassen sich zwar mithilfe von Messwtergebnissen treffen, sie bedürfen jedoch zu einer Einordnung einer Vergleichsgruppe. Neben gleichen Lernzielen zur Wahrung der Inhaltsvalidität der Aufgaben sollte die Konzeption der Aufgaben der Vergleichsgruppe hohen unterrichtlichen Standards genügen sowie von externen Lehrkräften begutachtet und befürwortet worden sein. Daher wurde die Konzeption der Unterrichtseinheit *Aufbau und Funktion des Gehirns und Pathologie der Alzheimer-Demenz* an die Unterrichtsmodule von Sternheim et al. (2017) angeknüpft.

Diese bieten neben einer umfangreichen Materialsammlung für den Einsatz im Biologieunterricht didaktische und methodische Überlegungen. Zudem wurden die dargebotenen Unterrichtsentwürfe mehrfach in der Unterrichtspraxis getestet und sind Inhalt deutschlandweiter Lehrkräftefortbildungen, die bei den Teilnehmenden auf durchweg positive Resonanz stießen.

Die Unterrichtseinheit *Der Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten* ist im Rahmen eines Kooperationsprojekts mit Lehrkräften entstanden. Es wurden auf Basis inhaltlicher Vorgaben (bspw. in Form von Lernzielen und bestehenden Unterrichtsmaterialien) die Vorstellungen der Lehrkräfte in individuell entwickelten AR-Apps umgesetzt. Diese wurden im Anschluss mit den Schüler:innen der jeweiligen Lehrkräfte getestet, evaluiert und für die weitere Studie angepasst. Anders als in der Unterrichtseinheit *Der Aufbau des menschlichen Gehirns und Pathologie der Alzheimer-Demenz* zielt diese Unterrichtseinheit nicht auf den Vergleich von AR und EUM ab, sondern es werden die Auswirkungen unterschiedlicher Steuerungsmechanismen (AR-Steuerung und Touch-Gestensteuerung) auf die UX, den CL und den LZ erforscht.

Digitale Inhalte

Eine Stärke von AR ist die Darstellung von 3D-Elementen im realen Raum. In der unterrichtlichen Praxis können 3D-Modelle hierdurch allen Schüler:innen zugänglich gemacht werden und somit kann eine räumliche Erfahrung ermöglicht werden. Dies wurde mithilfe kostenloser und kostenpflichtiger 3D-Modelle, unter Beachtung der Entwicklerlizenzen, in beiden Unterrichtseinheiten umgesetzt. Im Fall der AR-App zum Aufbau des menschlichen Gehirns und zur Pathologie der Alzheimer-Demenz konnte auf zwei 3D-Gehirn-Modelle zurückgegriffen werden, die aus Magnetresonanztomographie-Gehirn-Daten rekonstruiert wurden. Diese Modelle bildeten darüber hinaus die Grundlage zur Erstellung der physischen Modelle mittels 3D-Drucker. Aufgrund der hohen Polygondichte der 3D-Modelle wurden diese mit der Software Autodesk Meshmixer für den Einsatz in der AR-App optimiert, indem die Polygonanzahl des Alzheimer-Hirn-Modells von 625 380 auf 117 236 und die des Gesunder-Hirntyp-Modells von 315 242 auf 107 176 reduziert wurde. Die Reduktion der Polygonanzahl führte zu einer optimierten Rendergeschwindigkeit, sodass die App auch für leistungsschwächere Endgeräte nutzbar ist, sowie zu einer Verringerung der Dateigröße der Installationsdatei. Darüber hinaus hatte die Reduktion der Polygone kaum Einfluss auf die Auflösung der 3D-Dateien, sodass diese deckungsgleich über die physischen Hirnmodelle gelegt werden konnten. Die farbliche Hervorhebung der einzelnen Gehirnregionen und die Markierung der Gehirnfurchen (Sulci) erfolgten manuell mit der Software Cinema4D unter fachlicher Abstimmung mit der Abteilung für Humanbiologie und Humangenetik der rheinland-pfälzischen technischen Universität Kaiserslautern-Landau. Die 3D-Modelle des

Chloroplasten und des Mitochondriums wurden gegen Zahlung einer einmaligen Gebühr (Royalty Free) erworben, sodass diese in AR-Apps verwendet und veröffentlicht werden dürfen. Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen Mitochondrien und Chloroplasten zu gewährleisten, wurde ein Ausschnitt der Thylakoidmembran entfernt, sodass der Blick in das Thylakoidlumen möglich ist. Da das ursprüngliche Chloroplasten-Modell keine ATP-Synthasen in der Thylakoidmembran enthielt, wurden diese nachträglich hinzugefügt. Alle weiteren 3D-Elemente wurden entweder selbst mittels Cinema4D erstellt oder sind Basiselemente von Unity3D. Sämtliche Sprites (z. B. UI-Elemente), Trigger und andere Bilddateien wurden mit Adobe Photoshop CC 2017 erstellt und für die Nutzung in Unity3D optimiert.

5.2 Design und Funktionalität der Lernumgebungen

Da die AR-Anwendungen hinsichtlich der Gestaltung viele Gemeinsamkeiten aufweisen, wird im Folgenden zunächst die allgemeine Software-Design-Umsetzung beschrieben und danach wird auf App-spezifische Umsetzungen eingegangen.

Das Wireframe-Konzept der eingesetzten Apps sieht eine möglichst unkomplizierte und klare App-Struktur vor, sodass möglichst wenige kognitive Ressourcen (vgl. ECL) zur Navigation verwendet werden müssen und die Messungen nicht durch die App-Struktur beeinflusst werden. Demnach lässt sich die App-Struktur in zwei Ebenen gliedern: das Hauptmenü und die (AR-)Szenen³. Das Hauptmenü bildet den zentralen Navigationsbereich, von dem ausgehend die verschiedenen (AR-)Szenen angesteuert werden können. Ein direkter Wechsel zwischen den einzelnen (AR-)Szenen ist hingegen nicht vorgesehen, da sich diese hinsichtlich ihrer GUI-Gestaltung nicht unterscheiden, sodass ein versehentlicher Szenenwechsel nicht auffallen könnte und die Benutzerfreundlichkeit negativ beeinträchtigt würde. Dies könnte zwar mit einem zusätzlichen GUI-Element im Sinne eines Szenenindex gelöst werden, das würde aber ein weiteres ablenkendes Element darstellen.

Bei den Steuerungselementen des Hauptmenüs, die dazu dienen, in die entsprechende (AR-)Szene zu navigieren, handelt es sich um runde Buttons, die ca. 20 % der Displaybreite einnehmen und farblich von dem unifarbigen Hintergrund abgesetzt sind (vgl. Abb. 12, A). Darüber hinaus sind diese entsprechend der Aufgabenstellung beschriftet, sodass jeder Aufgabe eine (AR-)Szene zugeordnet werden kann (vgl. Abb. 12, B). Das Hauptmenü-Design ist für den Portrait-Modus optimiert. Das GUI der (AR-)Szenen umfasst sowohl in der *Gehirn-AR-App* als auch in der *Mitochondrien-und-Chloroplasten-App* drei konstante Elemente: In der oberen linken Ecke befindet sich ein weißer *Back-Button* (vgl. Abb. 13, A), durch den die Nutzer zurück ins Hauptmenü gelangen. Dieser ist ikonografisch an das Hauptmenü-Design

³ AR wurde in Klammern gesetzt, da es sich bei zwei der vier Szenen in der *Chloroplasten und Mitochondrien-App* nicht um AR-Szenen handelt.

angelehnt. Ebenfalls am linken Bildschirmrand befindet sich mittig ein *Menü-Button* (vgl. Abb. 13, B), der ein Untermenü öffnet. Dieses Untermenü besteht aus einem halbtransparenten, grauen Panel (vgl. Abb. 13, C), das vom linken Bildschirmrand eingeschoben wird, sodass der Kameramodus nicht unterbrochen wird und die Nutzenden während der Arbeit weitere Steuerungselemente der jeweiligen Szene bedienen können. Der Menü-Button ist ikonografisch durch einen weißen Pfeil (ohne Schaft) dargestellt, dessen Spitze in die Bildschirmmitte zeigt und sich bei ausgefahrenem Panel um 180° dreht. Um die Aufmerksamkeit der Nutzenden auf das Steuerungselement zu lenken, ist dieser initial mit einer pulsierenden Animation (Farbe und Skalierung) versehen. Zur Vermeidung permanenter Ablenkungen stoppt die Animation nach der ersten Bedienung. Darüber hinaus findet sich zentral im Display eine *Scan-Animation* (vgl. Abb. 13, D), bestehend aus sieben tropfenförmigen, konzentrisch pulsierenden Punkten, die dem Nutzer suggerieren, einen Trigger mit der Kamera zu fokussieren. Bei Erkennen des entsprechenden Triggers wird die Animation ausgeschaltet, sodass von der Scan-Animation keine Ablenkung ausgeht. Auf dem Panel, das sich durch Drücken des Menü-Buttons öffnet, erscheint zudem die Nachricht *Kein Trigger erkannt! Mit der Kamera die [Name Trigger] fokussieren, um Augmentierung zu starten* (vgl. Abb. 13, E), um den Nutzenden Hilfestellung bei der Verwendung der App zu geben. Wurde ein Trigger erkannt, verschwindet die Nachricht und die Steuerelemente (vgl. Abb. 13, F) werden sichtbar. Bei den Steuerungselementen handelt es sich um sog. Toggles des nativen Unity3D-Designs. Diese unterscheiden sich von Buttons (unidirektional) durch ihre bidirektionale Funktion, sodass hierdurch Informationen unterschiedlicher Art an- und ausgeschaltet werden können. Dargestellt werden diese durch ein quadratisches, weißes Kästchen mit grauer Umrandung, durch eine nebenstehende Beschriftung (Funktion/Inhalt) sowie mit einem Häkchen bei aktiviertem Toggle.

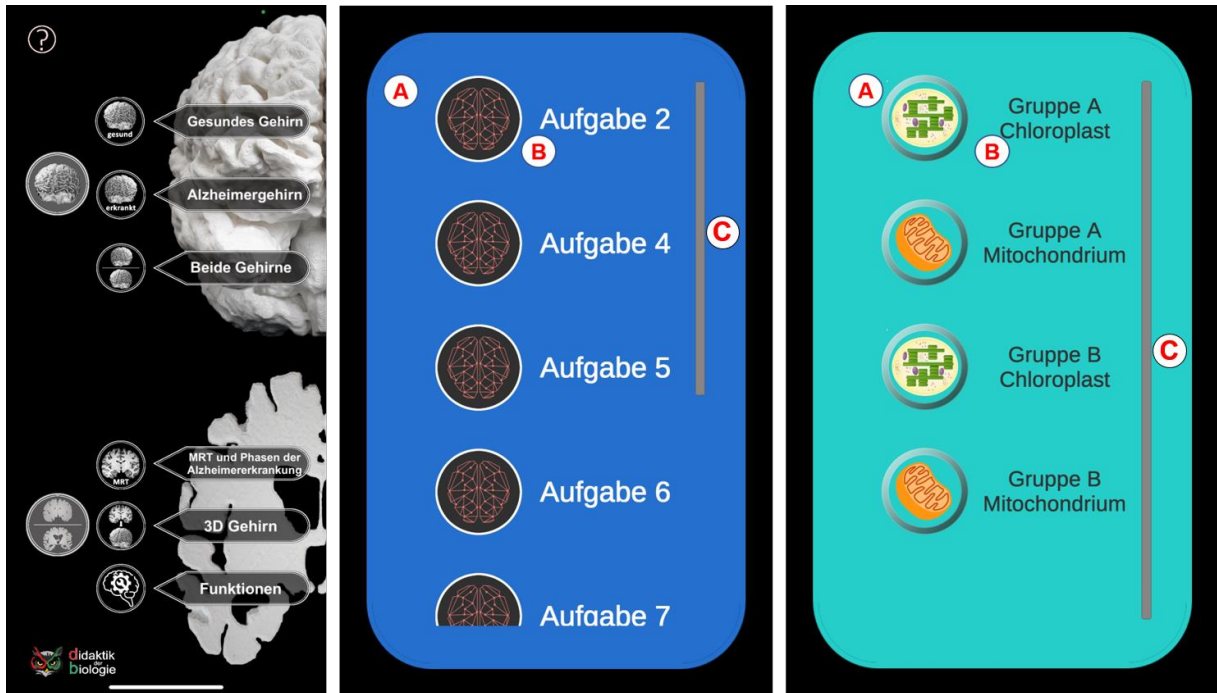


Abb. 12: Hauptmenüs der Apps: *Alzheimer AR* (links), *Gehirn AR* (Mitte) sowie *Mitochondrien und Chloroplasten* (rechts). A: Buttons zur Navigation in die (AR-)Szene, B: Beschriftung entsprechend der Lehrmaterialien, C: Scrollbalken.

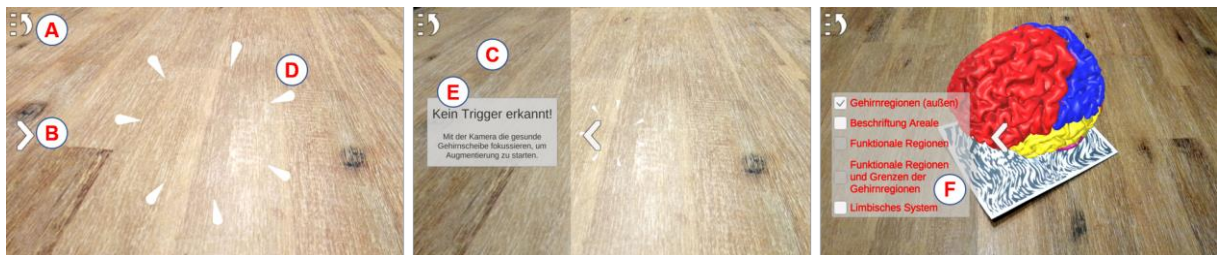


Abb. 13: Exemplarische Darstellung einer Augmented-Reality-Szene am Beispiel der *Gehirn-AR-App*. A: Back-Button, B: Submenü-Button, C: transparentes Panel, D: Scan-Animation, E: Instruktion, F: Steuerelemente.

Spezifische Gestaltung der *Gehirn-AR-App*

Das GUI des Hauptmenüs der *Gehirn-AR-App* folgt den vorangegangenen Beschreibungen: unifarbener Hintergrund (Farbwert: #256fce), runde Buttons (20 % der Displaybreite) mit nebenstehender Beschriftung (32 % der Displaybreite) und Scrollbalken (vgl. Abb. 12, C) aufgrund hoher Anzahl an AR-Szenen. Die Szenenbeschriftung des Hauptmenüs ist mit den Verweisen in den dazugehörigen Aufgabenstellungen des Lehrmaterials (vgl. Anhang 1.1.2, S. A9 f.) identisch, sodass jeder studienrelevanten Aufgabe eine gleichnamige AR-Szene zugeordnet werden kann. Innerhalb bestimmter AR-Szenen (Aufgabe 6 und Aufgabe 11) erscheint auf dem Panel des Untermenüs neben den Toggles ein Scrollbalken, um den Transparenzgrad der Overlays graduell zu verändern bzw. um zwischen einzelnen Stadien der Alzheimer-Demenz wechseln zu können.

Als Besonderheit des GUI ist in den AR-Szenen *Aufgabe 2* und *Aufgabe 9* die Verwendung von Virtual Buttons (Abb. 14, A, B) zu nennen. Diese Steuerungselemente unterscheiden sich von anderen GUI-Elementen dadurch, dass sie nicht auf dem Display verortet sind, sondern sich auf den Triggerplatten der Gehirne (Abb. 14, C, D) befinden und durch Interaktion mit dem Realobjekt steuerbar sind. Virtual Buttons reagieren auf Überdeckung und sind funktional variabel, sodass ihnen durch entsprechende Programmierung unidirektionale (vgl. Buttons) oder bidirektionale (vgl. Toggles) Funktionen zugeordnet werden können. Im Kontext der *Gehirn-AR-App* lassen sich farbige Gehirnregionen (Abb. 14, E), deren Beschriftung sowie Gehirnfurchen auf das weiße 3D-Gehirnmodell projizieren. Da die Überdeckung der Virtual Buttons nicht selektiv auf Finger beschränkt ist, reagieren die Buttons auch auf Überdeckung durch das Gehirnmodell selbst (bspw. bei posteriorer Betrachtung). Um dem entgegenzuwirken, befindet sich auf der posterioren Seite der Triggerplatte ebenfalls ein (unsichtbarer) Virtual Button, der im Falle einer Nichtüberdeckung die anterioren Virtual Buttons deaktiviert. Hierdurch wird eine 360°-Betrachtung des Gehirnmodells realisiert, ohne dass unbeabsichtigt Informationen an- oder ausgeschaltet werden. Weitere, nicht auf die Display-GUI beschränkte Bedienelemente, finden sich in der AR-Szene *Aufgabe 7*. In dieser können die Funktionen der einzelnen Gehirnregionen durch Antippen entsprechender Areale des virtuellen 3D-Modells auf dem Display angezeigt werden.

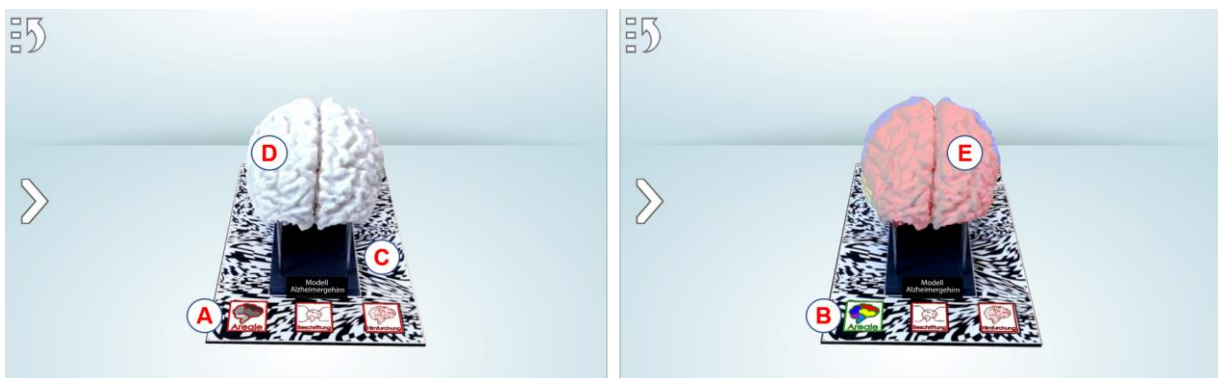


Abb. 14: Augmented-Reality-Szene Aufgabe 2. **A:** Virtual Button (off), **B:** Virtual Button (on), **C:** Triggerplatte, **D:** Hirnmodell 3D-Druck, **E:** transparente Projektion des 3D-Hirnmodells (Hirnareale).

Spezifische Gestaltung *Mitochondrien-und-Chloroplasten-App*

Der Aufbau des Hauptmenüs der *Mitochondrien-und-Chloroplasten-App* ist dem der *Gehirn-AR-App* identisch. Unterschiede finden sich lediglich in der Gestaltung der GUI-Elemente und bei der Hintergrundfarbe (Farbwert: #25cec9). Aus dem Hauptmenü lassen sich vier (AR-)Szenen mittels kreisrunder Buttons ansteuern (vgl. Abb. 12, A). Das Logo der Buttons entspricht den Inhalten der zugeordneten Szene (Mitochondrium oder Chloroplast). Um die Navigation zu erleichtern und die Gruppenzuordnung klar zu kennzeichnen, gibt die

nebenstehende Beschriftung ebenfalls Aufschluss über den Szeneninhalt und die Gruppenzugehörigkeit (vgl. Abb. 12, B). Bei zwei der vier Szenen handelt es sich um Nicht-AR-Szenen, die jedoch inhaltlich identisch mit den AR-Szenen sind und sich lediglich in der Steuerungsart unterscheiden (vgl. Abb. 15).

Das UI der (AR-)Szenen entspricht den zuvor dargelegten Darstellungen, sodass sich die einzelnen Bestandteile des Chloroplasten bzw. Mitochondriums im Untermenü mittels Toggles an- und ausschalten lassen (vgl. Abb. 15, A). Die Beschriftung der 3D-Modelle erfolgt mittels Labels und 3D-Pfeilen (vgl. Abb. 15, B). Zusätzlich nutzen die Labels den sog. Billboard-Effekt, sodass diese den Nutzenden unabhängig vom Blickwinkel stets senkrecht erscheinen. Dies ermöglicht eine Betrachtung der 3D-Strukturen aus allen Perspektiven, ohne dass die Lesbarkeit der Labels beeinträchtigt wird. Um einen möglichst hohen Figur-Grund-Kontrast zu erreichen, wurde für die Labels eine schwarze, serifenlose Schrift auf weißem Grund gewählt. In den Nicht-AR-Szenen werden die 3D-Modelle des Chloroplasten und des Mitochondriums nicht auf einen Trigger im Realraum projiziert, sondern hinter einem neutralen, unifarbene Hintergrund (Farbwert: #314e7a) gerendert. Zur Steuerung des 3D-Modells wird die auf anderen Smartphone-Anwendungen etablierte Touch-Gestensteuerung mithilfe des Unity3D-Plug-ins Lean Touch+ (Wilkes, 2021) verwendet. Dabei wird eine Rotation des 3D-Modells durch eine Zirkelbewegung mit zwei Fingern erreicht. Zur Skalierung kommt die Pinch-to-Zoom-Geste zum Einsatz, wie sie auch auf mobilen Webseiten oder Fotos eingesetzt wird. Zusätzlich findet sich auf dem GUI ein Reset-Button (vgl. Abb. 15, C), der das 3D-Modell in die ursprüngliche Skalierung und Ausrichtung zurückführt.

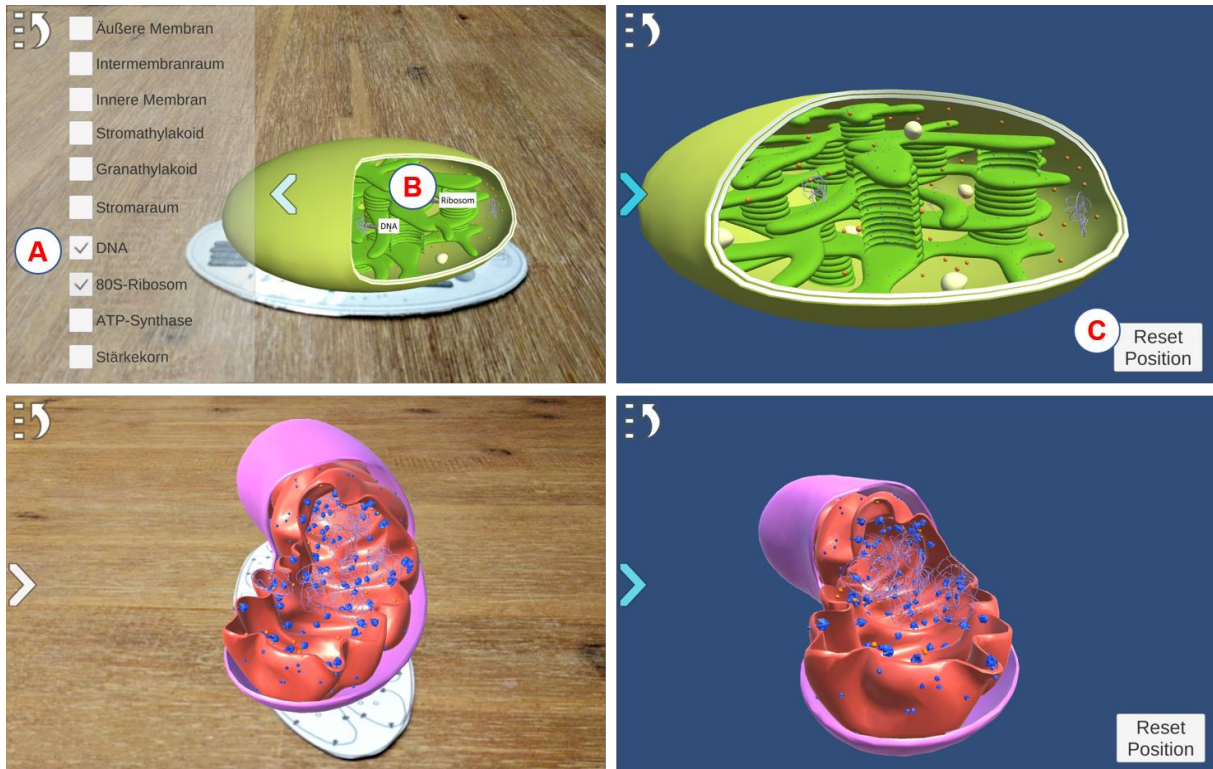


Abb. 15: Bildschirmfotos der Mitochondrien & Chloroplasten App. Chloroplast AR-Steuerung (oben links), Chloroplast Touch-Steuerung (oben rechts), Mitochondrium AR-Steuerung (unten links), Mitochondrium Touch-Gestensteuerung (unten rechts). A: Steuerelemente, B: Label mit Billboard-Effekt, C: Reset-Button.

Spezifische Gestaltung *HoloBrain-App*

Wie beim Alzheimerkoffer ist hier die Hirnanatomie der zentrale Lerninhalt, der unterstützt durch virtuelle AR-Hirnmodelle fokussiert wird. Die funktionale Realisierung stützt sich hier jedoch auf ein mit dem Merge Cube [(Merge Labs, 2021)] vergleichbares Prinzip, das ohne reales Modell auskommen soll. Ein physisch nicht vorhandenes Modell kann über einen solchen Würfel virtuell kontrolliert und bewegt werden. Eine Verschränkung der AR-Komponente mit der Realität beschränkt sich auf die Lage und Manipulation der virtuellen Hirnmodelle. (Thyssen et al., 2020, S. 42)

Die *HoloBrain-App* unterscheidet sich von den beiden vorangegangenen Apps im Design und im Aufbau (vgl. Abb. 16). Die App-Struktur umfasst auch hier ein Hauptmenü, von dem aus zwei AR-Szenen angesteuert werden können. Die Buttons der AR-Szenen sind mit *Opaque Brain* und *Transparent Brain* beschriftet und nehmen etwa 60 % der Displaybreite ein (vgl. Abb. 16, A). Der Hintergrund ist schlicht schwarz gehalten und mit einer drehenden Animation eines farbigen Hirnmodells versehen. Im Vordergrund sind neben den Buttons der AR-Szenen der Name der App in Großbuchstaben und die aktuelle Versionsnummer dargestellt.

Über einen Button (Zahnrad) am oberen linken Displayrand (vgl. Abb. 16, B) können nach Eingabe des Admin-Passworts bestimmte Funktionen und Einstellungen der App konfiguriert werden (vgl. Abb. 16, Mitte). Es lassen sich bestimmte Szenen aktivieren und deaktivieren sowie Zeiten für die Aktivierung der Toggles in den AR-Szenen festlegen. Somit kann die App variabel verschiedenen Fragestellungen und Einsatzszenarien angepasst und mögliche Fehleingaben durch die Nutzenden können verhindert werden.

Nachdem im Hauptmenü eine der AR-Szenen ausgewählt wurde, werden die Nutzenden aufgefordert, ihre individuelle vierstellige Kennung einzugeben. Zulässig sind gemäß dem Studiendesign nur Buchstaben ohne Umlaute. Bei Eingabe von Ziffern oder anderen unzulässigen Zeichen wird eine Fehlermeldung ausgegeben. Die Eingabe der Kennung wird durch den Button *Szene betreten* bestätigt und die Aufzeichnung von Eingaben beginnt. Während der aktiven AR-Szene werden im Hintergrund folgende Parameter in einer .csv-Datei erfasst: Geräteidentifikationsnummer, Name der aktiven Szene, Kennung, initiale Funktionseinstellung, Startzeit der Szene, Zeitstempel der Toggle-Eingaben, Endzeit der Szene, Nutzungsdauer sowie Erkennungsdauer bestimmter Trigger.

Die AR-Szenen unterscheiden sich lediglich in der visuellen Repräsentation des 3D-Hirnmodells, sonstige Inhalte und Darstellungen sind identisch, sodass ein valider Vergleich gewährleistet werden kann. In der AR-Szene *Opaque Brain* wird das 3D-Hirnmodell dem Szenennamen entsprechend deckend gerendert (vgl. Abb. 16, E), sodass die genutzten Trigger vollständig verdeckt werden. Die AR-Szene *Transparent Brain* hingegen stellt das 3D-Hirnmodell mit einem 60%igen Transparenzgrad dar, sodass die genutzten Trigger durchschimmern. Die App erkennt einen Würfel der Kantenlänge 6 cm mit sechs unterschiedlichen Markierungen an den Seiten (vgl. Abb. 16, D) sowie den 3D-Druck der *gesunden* Gehirnscheibe des Alzheimerkoffers als mögliche Trigger. Bei beiden Triggern erscheint ähnlich wie bei der *Gehirn-AR-App* ein dreidimensionales Gehirnmodell, das durch Drehen des Würfels bzw. der Gehirnscheibe von allen Seiten betrachtet werden kann. Im Fall einer senkrechten Positionierung der Gehirnscheibe zur Kamera wird die Augmentierung abgebrochen, da zu wenige Berechnungspunkte vorliegen. Im Gegensatz dazu ermöglicht der Würfel eine unterbrechungsfreie Arbeit mit dem 3D-Modell, sofern keine störenden Reflexionen auf der Würfeloberfläche auftreten.

Die Steuerungselemente der AR-Szenen umfassen zwei Toggles und zwei Buttons. Die Toggles befinden sich gespiegelt in den unteren Ecken des Bildschirmrands (vgl. Abb. 16, F), sodass diese sowohl von rechts- als auch von linkshändigen Personen betätigt werden können. Entsprechend den zuvor vorgenommenen Einstellungen können die Toggles direkt Eingaben ausführen oder erst nach Ablauf einer festgelegten Zeit. Im Fall einer zeitlichen Beschränkung erscheint der Toggle ausgegraut. Zusätzlich zeigt ein Timer die noch

abzuwartende Zeit an. Am oberen linken Displayrand befindet sich ein Button (gedrehter Pfeil), der die Einstellungen öffnet (vgl. Abb. 16, G). Da dieser Bereich dem Admin vorenthalten ist, wird anderen Nutzenden der Zugang erschwert, indem der Button fünf Sekunden lang gedrückt und anschließend das Admin-Passwort eingegeben werden muss. Eine direkte Passwordeingabe würde in diesem Kontext eine mögliche Ablenkung bedeuten und so die Studie beeinflussen. Ähnlich wie im Hauptmenü kann in den Admin-Einstellungen während der laufenden Szene Einfluss auf die Funktionalität der Toggles genommen werden. Wenn beide Toggles aktiv sind, erscheint am oberen rechten Bildschirmrand ein weiterer Button mit der Beschriftung *End* (vgl. Abb. 16, H). Dieser beendet die Szene und stoppt die im Hintergrund laufende Datenaufzeichnung. Um die Gefahr zu minimieren, die Szene versehentlich zu beenden, muss dieser Vorgang nochmals bestätigt werden.

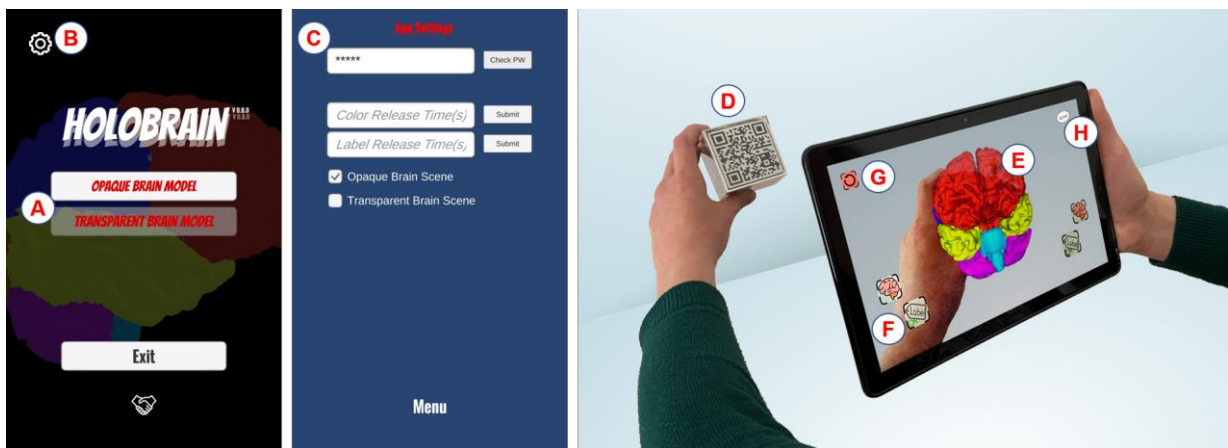


Abb. 16: Darstellungen der HoloBrain-App. Hauptmenü (links), Einstellungsmenü (Mitte), Augmentierung mit QR-Cube als Trigger. A: Menü-Buttons, **B:** Einstellungsmenü-Button, **C:** Eingabefeld Admin-Passwort, **D:** QR-Cube, **E:** 3D-Hirnmodell (opaque), **F:** Steuerelemente, **G:** Einstellungsmenü-Button, **H:** Ende-Button.

5.3 Technische Voraussetzungen

Wie die Erfahrungen aus den durchgeführten Vorstudien mittels Bring-your-own-Device (BYOD)-Ansatz gezeigt haben, trägt nicht nur die eingesetzte Software maßgeblich zur individuellen UX bei, sondern auch die eingesetzten Endgeräte, auf denen die Software genutzt wird. Beispielsweise hat die Displaydiagonale einerseits wesentlichen Einfluss auf die Größe der dargestellten 3D-Informationen und andererseits geht mit einem größeren Display auch ein höheres Gewicht einher, das schnell zu Ermüdungserscheinungen führen kann. Der Prozessor und die Grafikeinheit sind zentrale Schaltstellen für das Rendern der teils rechenintensiven 3D-Modelle. Ältere und leistungsschwächere Endgeräte können zu einer negativen UX beitragen, wenn diese bspw. keine Bildschirmrate über 30 Hz aufrechterhalten

können und das Bild stockt. Daher wurden in den Studien Android-basierte Tablets der Marke Huawei (MediaPad M5) gewählt. Diese bieten gegenüber vergleichbaren Tablets neben dem guten Preis-Leistungs-Verhältnis eine leistungsstarke Hardware, eine Displaydiagonale von 10,8“ sowie eine 13-Megapixel-Kamera, die vor allem zur effizienten Erkennung von Triggern entscheidend ist. Um die einhändige Handhabung der Tablets zu vereinfachen und der Ermüdung durch das lange Halten vorzubeugen, befindet sich an der Rückseite der Tablethülle (Marke Armor-X) eine Handschleife, die individuell angepasst werden kann.

Unter Berücksichtigung der Klassen- bzw. Kursgröße kamen 25 Tablets zum Einsatz, die über das Meraki-Mobile-Device-Management-System (MDM) administriert wurden. Das MDM-System erlaubt es, zentral Zugriffsrechte, Systemeinstellungen und App-Installationen zu steuern, sodass die Tablets für die Studie optimiert und entbehrliche Apps sowie Funktionen gesperrt werden konnten. Aufgrund der nicht universellen Verfügbarkeit von Internet in Schulen wurden die Datenerhebungen von lokalen Servern realisiert. Hierzu wurden zwei Raspberry Pi 3B+ mit dem Apache2-Webserver und LimeSurvey konfiguriert, sodass diese jeweils ein eigenes WLAN-Netzwerk zur Verfügung stellen, mit dem sich die Tablets verbinden können.

Aufgrund der begrenzten Anzahl möglicher Verbindungen (max. 13) mit dem Dynamic-Host-Configuration-Protocol-Server wurden zwei Raspberry Pi 3B+ eingerichtet, sodass sich die Tablets je zur Hälfte mit einem der Server verbinden konnten. Der Einsatz lokaler Server bringt neben der Unabhängigkeit von der lokalen Infrastruktur weitere methodische Vorteile mit sich, da diese nicht mit dem Internet verbunden sind und sich die erhobenen Daten lokal auf den Geräten befinden. Die auf LimeSurvey eingerichteten Fragebögen und Tests können über den Webbrowser und die entsprechende Netzwerkadresse aufgerufen werden. Hierzu wurde eine entsprechende Browser-Verknüpfung auf den Home-Screens der Tablets eingerichtet, sodass die Teilnehmenden direkten Zugang zu den Fragebögen hatten. Um Ablenkungen durch nicht studienrelevante Apps zu reduzieren, wurden diese entweder seitens des MDM-Systems deaktiviert oder von den Home-Screens entfernt. Die LimeSurvey-Browser-Verknüpfung und die jeweils relevante AR-App wurden darüber hinaus am oberen linken Bildschirmrand positioniert. Zu Beginn jeder Erhebung wurden den Teilnehmenden der organisatorische Rahmen, die Benutzung der App sowie die Schritte zum Ausfüllen der Fragebögen mithilfe von PowerPoint-Folien und einem Tablet aufgezeigt.

5.4 Vorstudien

Den Hauptstudien (*Aufbau des menschlichen Gehirns, Pathologie der Alzheimer-Demenz sowie Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten*) und der Detailstudie zur *HoloBrain-App* sind verschiedene Vorstudien vorausgegangen. Anhand der hieraus gewonnenen Daten und

untersuchungspraktischen Erfahrungen wurden die Hauptstudien angepasst. Die Adaptionen lassen sich in drei Kategorien einteilen: technische Anpassungen, methodisch-organisatorische Anpassungen sowie instrumentale Anpassungen. Im Folgenden wird die Genese der Änderungen für die Hauptstudien dargelegt.

5.4.1 Alzheimerkoffer

Im Fall der App zum Aufbau des menschlichen Gehirns und der Pathologie der Alzheimer-Demenz (*Gehirn-AR-App*) gingen in den Jahren 2018 und 2019 insgesamt 4 Projektstage in der sechsten Klassenstufe ($n = 139$) des Kaiserslauterner Burggymnasiums sowie weitere Erhebungen in der Sekundarstufe II ($n = 78$) an 3 weiteren rheinland-pfälzischen Gymnasien voraus. Weiterhin war die Gehirn-AR-App wesentlicher Bestandteil mehrerer Fortbildungen für Lehrkräfte ($n = 53$). Der erste Einsatz dieser App im schulischen Kontext war im Juni 2018 an zwei Projekttagen mit Schüler:innen der sechsten Jahrgangsstufe. Die Untersuchung war in die beiden aufeinanderfolgenden Unterrichtseinheiten *Der Aufbau des menschlichen Gehirns* und *Die Pathologie der Alzheimer-Demenz* eingebettet und umfasste den zeitlichen Umfang von sechs Schulstunden á 45 Minuten.

Methodisch-organisatorische Anpassungen

Im Jahr 2018 sah der Ablauf der Untersuchung ein Kreuzdesign zwischen beiden Unterrichtseinheiten vor, sodass die in Gruppe A befindlichen Schüler:innen die Aufgaben zum Aufbau des menschlichen Gehirns mit AR bearbeiteten und die Aufgaben der anschließenden Unterrichtseinheit Pathologie der Alzheimer-Demenz mit EUM erfolgten. Im Folgejahr 2019 wurde das Kreuzdesign innerhalb der Unterrichtseinheiten angewendet, sodass nunmehr ein Medienwechsel zwischen einzelnen Aufgaben stattfand. Des Weiteren sah das Untersuchungsdesign 2018 einen Pre-Test zu Beginn des Projekttags und einen Post-Test nach dem Projekttag vor. Um Ermüdungseffekte bei den Erhebungen im Jahr 2019 auszuschließen, wurde der Post-Test in zwei Teile aufgeteilt, die nach der jeweiligen Unterrichtseinheit erfolgten und später bei der Datenaufbereitung zusammengefügt wurden. Weiterhin wurden 2018 die Daten des CL in der Abschlussbefragung zum Ende des Projekttags erhoben, sodass lediglich der ICL und der GCL über beide Unterrichtseinheiten hinweg sowie der ECL für die AR-App ermittelt werden konnten.

Um detaillierten Aufschluss über die Auswirkungen des Medieneinsatzes in unterschiedlichen Lernszenarien zu erhalten, wurde 2019 entschieden, die Daten zum CL für einzelne Aufgaben wie auch über die Unterrichtseinheiten hinweg zu erfassen. Aufgrund des hieraus resultierenden erhöhten Datenaufkommens und der zeitintensiven manuellen Digitalisierung der Fragebögen wurden an den Projekttagen im Jahr 2019 und bei den Fortbildungen für Lehrkräfte die Daten über die Online-Plattform SoSci Survey erhoben. Da nicht alle Schulen

die infrastrukturellen Gegebenheiten für eine Onlinebefragung bieten bzw. diese nicht gewährleisten können, wurde die Erhebung für die Hauptstudie mithilfe von LimeSurvey als Offline-Lösung durch Einrichtung eines lokalen Netzwerks umgangen (vgl. Kapitel 5.3). Die Pre- und Post-Tests wurden jedoch von dieser Entscheidung ausgenommen und verblieben als Paper-Pencil-Test, da die Tests halboffene Aufgaben und Zeichenaufgaben beinhalteten. Gründe hierfür liegen in der knappen und oft unzureichenden Beantwortung von halboffenen Aufgaben, bedingt durch die Tablet-Tastatur, sowie in der fehlenden technischen Umsetzbarkeit in LimeSurvey. Da sich die Schüler:innen der sechsten Klasse trotz didaktischer Reduktion in der praktischen Durchführung von der Thematik überfordert zeigten und Ermüdungserscheinungen auftraten, wurde diese Alterskohorte für die Hauptstudien ausgeschlossen.

Technische Anpassungen

Die technischen Anpassungen liegen primär im Software-Design und im Funktionsumfang der App sowie im Einsatz unterschiedlicher Tablets begründet. In der App-Version der Vorstudien wurde ein alternatives Menü mit fünf AR-Szenen genutzt. Obwohl die Beschriftungen der AR-Szenen (bspw. *3D Gehirn*) den Verweisen in den Aufgabenstellungen entsprachen, kam es häufig zu einer fehlerhaften Auswahl. Die falsche Szenenauswahl konnte für die Hauptstudien durch die Neugestaltung des Hauptmenüs unter Anpassung der Aufgabenstellung realisiert werden. Somit entspricht die Szenenbeschriftung des Hauptmenüs nicht nur dem Verweis innerhalb der Aufgabenstellung, sondern auch dem Aufgabenindex (bspw. *Aufgabe 2*).

Um die Benutzungsfreundlichkeit weiter zu erhöhen, wurde innerhalb der AR-Szenen ein Hinweis platziert, der angibt, welche Trigger zur Augmentierung benötigt werden. In den Vorstudien stand dieser Hinweis ausschließlich in den Aufgabenstellungen und wurde häufig nicht gelesen bzw. übersehen. Weiterhin wurde die Gehirn-AR-App in der Hauptstudie um die AR-Szene zur funktionalen Einteilung der Gehirnregionen erweitert. Bis zur Hauptstudie wurden unterschiedliche Ansätze (BYOD vs. Managed Devices) und Endgeräte getestet. In den ersten Projekttagen 2018 kamen Android-Tablets der Marke Acer (Modell: Iconia Tab A1-810) zum Einsatz. Die App ließ sich zwar auf den Tablets ausführen, zeigte aber deutliche Schwachstellen in der praktischen Nutzung, die auf die Rechenleistung und die Kameraqualität zurückzuführen waren: stockendes Bild, plötzliches Beenden der App, instabiles Tracking etc. Daher wurde im Folgejahr 2019 die Erhebung test- und leihweise auf Apple iPads (4. Generation) durchgeführt. Dies machte eine Neuprogrammierung und Optimierung der App für iOS-Geräte erforderlich. Das plötzliche Beenden der App konnte durch den Transfer auf iOS behoben werden. Das stockende Bild und der plötzliche Trigger-Verlust wurden zwar minimiert, traten aber dennoch in problematischem Maße auf. Probleme bei der praktischen Arbeit bereiteten außerdem die Falthüllen der iPads. Diese boten zwar

einen guten Displayschutz, versperrten jedoch oftmals die Kamera oder die Sicht auf das Display und führten so zu einer Beeinträchtigung. Dadurch wurden die Auswirkungen bestimmter Hüllen als weitere Faktoren für die Hauptstudie identifiziert.

Für die Hauptstudien kamen Hüllen der Marke Armor-X mit integrierter Handschlaufe auf der Rückseite zum Einsatz, sodass das Kamerabild nicht beeinträchtigt und die einhändige Bedienbarkeit verbessert wurde. Weitere positive Erfahrungen konnten an dieser Stelle durch das genutzte MDM-System der iPads verzeichnet und für die Hauptstudie ebenfalls umgesetzt werden. In den Lehrkräftefortbildungen wurde ein BYOD-Ansatz verfolgt, um weitere Ergebnisse zur Performance auf verschiedenen Endgeräten sammeln zu können und so einen schulpraktischen Einsatz bewerten zu können. Während die Lehrkräfte begeistert waren, dass ihre Endgeräte in der Lage sind, die Technik zu nutzen, brachte der BYOD-Ansatz einige Schwierigkeiten für die wissenschaftliche Erhebung mit sich: Die Studienleitenden hatten keine Kontrolle über die Geräte und deren Nutzung, viele unterschiedliche Endgeräte bergen tendenziell viele individuelle Probleme. Die Installation von Fremdsoftware auf Handys von Schüler:innen kann rechtliche Bedenken aufwerfen, die App-Installation für iOS-Geräte ist an eine Veröffentlichung im App-Store gebunden und eine unzureichende Validität aufgrund von zusätzlichen Störvariablen ist möglich.

Auf Grundlage der Erfahrungen mit unterschiedlichen Endgeräten, Betriebssystemen und dem BYOD-Ansatz fiel die Endgerätewahl auf Android-Tablets der Marke Huawei (Modell: MediaPad M5). Die Vorteile liegen u. a. in der einfachen Distribution von selbst entwickelten Apps über ein MDM-System, einer guten Hardwareausstattung sowie der Verortung im gehobenen mittleren Preissegment.

Anpassung Testinstrumente

Die Aufgaben der Pre- und Post-Tests sind aus den Lernzielen der Unterrichtseinheiten abgeleitet und bilden dadurch die Lerninhalte der im Kreuzdesign der Studie behandelten LS ab. Lernaufgaben, die nicht zentraler Gegenstand der Untersuchung sind, wurden in der Abfrage des Vorwissens und des Lernerfolgs nicht berücksichtigt. In den Vorstudien 2018 wurden die von Leppink et al. (2013) entwickelten Items zur Messung des CL verwendet. Diese wurden thematisch der Untersuchung angepasst, aus dem Englischen ins Deutsche übersetzt und von dritter Stelle rückübersetzt, um Fehlinterpretationen als Resultat der Übersetzung entgegenzuwirken.

In den Hauptstudien wurde der Fragebogen um weitere Items von Paas (1992), Ayres (2006), Salomon (1984) und Cierniak et al. (2009) ergänzt, mit denen ebenfalls verschiedene Dimensionen des CL erfasst werden sollen. Mit Erweiterung der Studie um die Unterrichtseinheit *Mitochondrien und Chloroplasten*, bei der ein verstärkter Fokus auf die Erfassung der UX gelegt wird, wurde der von Laugwitz et al. (2008) entwickelte UEQ als Teil

der Abschlussbefragung und als wesentlicher Bestandteil der Hauptstudie zum Aufbau des menschlichen Gehirns und zur Pathologie der Alzheimer-Demenz hinzugefügt.

5.4.2 Mitochondrien und Chloroplasten

Die Studie zum Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten ist aus einem breit angelegten Kooperationsangebot in Zusammenarbeit mit rheinland-pfälzischen Lehrkräften entstanden. Auf Grundlage der von den Lehrkräften formulierten Lernziele, bestehender Unterrichtsmaterialien sowie der individuellen Wünsche zur digitalen Umsetzung wurden eigenständige AR-Apps programmiert und mit den Schüler:innen (n = 20) der jeweiligen Lehrkräfte erprobt sowie evaluiert. Anhand des Feedbacks der Schüler:innen und der quantitativen Ergebnisse wurde die App für die Hauptstudie optimiert und um zusätzliche Testinstrumente erweitert.

Technische Anpassung

Während die digitalen 3D-Modelle als ansprechend empfunden wurden, richtete sich ein Großteil des Feedbacks auf die Größe und Lesbarkeit der Labels. Diese wurden als zu klein empfunden und daher für die Hauptstudie vergrößert. Zusätzlich wurden die Labels mit dem Billboard-Effekt versehen, wodurch diese immer senkrecht zum Kamerawinkel dargestellt werden. Dadurch nimmt der Blickwinkel auf das 3D-Modell keinen Einfluss mehr auf die Lesbarkeit der Labels. Als weitere technische Anpassung wurden die Trigger verändert. In der Vorstudie wurden diese auf Papier gedruckt und den Schüler:innen zur Verfügung gestellt. Aufgrund der Biegsamkeit des Papiers konnten die Zettel nur auf einer flachen Oberfläche eingesetzt werden, da das Anheben zu einer Verzerrung des Triggers führte und damit einhergehende Renderprobleme auftraten. Für die Hauptstudie wurden die Trigger auf Papier gedruckt, ausgeschnitten und auf 4 mm starke Wellpappe geklebt. Dadurch konnte eine größere Interaktion der Versuchsteilnehmenden mit den Triggern erzielt werden, da mit diesem Vorgehen nicht nur die Tablets um den Trigger bewegt werden konnten, um die Perspektive auf das 3D-Modell zu ändern, sondern auch der Trigger relativ zur Kamera des Tablets bewegt werden konnte.

Anpassung der Testinstrumente

In den Vor- und Hauptstudien wurde auf die Erfahrungen aus den vorangegangenen Erhebungen zur Gehirn-AR-App aufgebaut, sodass die von Leppink et al. (2013), Paas (1992), Ayres (2006), Salomon (1984) und Cierniak et al. (2009) entwickelten Items zur Messung des CL herangezogen wurden. Um die Auswirkungen der UX auf einzelne Dimensionen der CLT zu erfassen und einen praktischen Vergleich verschiedener Steuerungsmechanismen zu ermöglichen, wurde in den Hauptstudien ebenfalls der UEQ (Laugwitz et al., 2008; Schrepp et al., 2014) eingesetzt.

5.4.3 HoloBrain

„Um AR als Element im Unterricht weiter zu untersuchen, wurde als Vergleich zum Konzept des Alzheimerkoffers die HoloBrain-App im Rahmen einer Kooperation der Fachdidaktik Biologie an der PH Ludwigsburg und der RPTU zur Testung Ihres Einsatzes in Lernprozessen entwickelt.“ (Thyssen et al., 2020, S. 42) Eine erste Erhebung wurde mit Lehramtsstudierenden der PH Ludwigsburg (n = 36) durchgeführt und Daten zum Vorwissen, zum Lernerfolg und zur Immersion wurden aufgenommen. Es wurden keine technischen und methodisch-organisatorischen Anpassungen vorgenommen, um die Vergleichbarkeit zwischen beiden Erhebungen gewährleisten zu können. Damit sind eventuelle Einschränkungen der Vergleichbarkeit auf die Anpassung der Testinstrumente zurückzuführen, die sich wie folgt ergeben.

Anpassungen Testinstrumente

In der ersten Erhebung an der PH Ludwigsburg wurden das Vorwissen und der Lernerfolg mithilfe der Quiz-Funktion in der Lernplattform Moodle erhoben. Das Quiz umfasste jeweils zwei Aufgaben mit einer zeitlichen Beschränkung von 90 Sekunden. Zur Beantwortung der Aufgaben mussten Textboxen mit Begriffen mittels Drag and Drop auf einer Abbildung platziert werden. Für die spätere Erhebung mit Lehramtsstudierenden der TU Kaiserslautern (n = 28) musste aufgrund der Zugangsberechtigungen von Moodle auf die Lernplattform OLAT ausgewichen und das Quiz musste angepasst werden (vgl. Abb. 25, S. 137). Da sich in OLAT nur Textboxen per Drag and Drop einander zuordnen lassen, erfolgte eine Kennzeichnung von Positionen in der Abbildung mittels Buchstaben. Gleichzeitig wurden Textboxen mit entsprechenden Buchstaben und Textboxen mit den zuzuordnenden Begriffen angelegt. Da dies zu einer Beeinträchtigung des intuitiven Aufgabencharakters geführt hat, wurde eine Übungsaufgabe gleichen Typs vorangestellt. Weiterhin war es nicht möglich, die zeitliche Beschränkung von 90 Sekunden beizubehalten, da in OLAT nur Minutenintervalle zulässig sind. Weil die Teilnehmenden vor den eigentlichen Aufgaben ihre vierstellige individuelle Kennung eingeben mussten und dies im Fall von Moodle nicht innerhalb des Zeitfensters lag, wurde der Grenzwert in OLAT auf 120 Sekunden gesetzt. Zusätzlich wurde die Erhebung durch Implementation der Fragebögen zum CL und zur UX (UEQ) ergänzt.

5.5 Stichprobe

Insgesamt nahmen an den drei Studien 769 Schüler:innen und Studierende teil (vgl. Tab. 7). Davon partizipierten 567 Personen an mindestens einer Unterrichtseinheit zum Alzheimerkoffer, 138 zum Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten sowie 64 an der HoloBrain-Studie. Die Unterrichtseinheiten zum Alzheimerkoffer wurden an 15 rheinland-pfälzischen Schulen mit 32 Klassen bzw. Kursen durchgeführt. Unter den Klassen und Kursen

waren 140 Schüler:innen der sechsten Jahrgangsstufe, 70 Schüler:innen der Sekundarstufe I sowie 357 Schüler:innen der Sekundarstufe II. Die Kurse lassen sich wiederum in 15 Leistungskurse und vier Grundkurse aufteilen.

Während die Studie zum Aufbau von Chloroplasten und Mitochondrien an fünf Schulen mit sieben Leistungskursen durchgeführt wurde, fokussierte sich die Detailstudie der HoloBrain-App auf Biologie-Lehramtsstudierende von zwei Universitäten. Das Geschlechterverhältnis der Schüler:innen war sowohl in den Unterrichtseinheiten zum Alzheimerkoffer (♀ = 55,4 %, ♂ = 43,4 %, divers = 1,2 %) als auch in denen zum Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten (♀ = 72,6 %, ♂ = 24,2 %, divers = 3,2 %) zugunsten der Teilnehmerinnen verschoben. Diese Verschiebung lässt sich auf die generelle Geschlechterverteilung in Biologie-Leistungskursen zurückführen (Rheinland-Pfalz: ♀ = 62,5 %, ♂ = 37,5 %) (KMK, 2019, S. 28).

Tab. 7: Anzahl der Studienteilnehmenden für einzelne Unterrichtseinheiten nach Geschlecht, Schulform, Sekundarstufe und Kursform.

Unterrichtseinheit	n	n (Geschlecht)			n (Schulform)		n (Sekundarstufe)		n (Kursform)			
		weiblich	männlich	divers	k. A.	Gym	IGS	NaWi	Sek I	Sek II	GK	LK
Aufbau des menschlichen Gehirns	567	270 (55,4 %)	212 (43,4 %)	6 (1,2 %)	79	509	58	140	70	357	62	295
Pathologie der Alzheimer-Demenz	413	217 (55,6 %)	169 (40,9 %)	4 (1 %)	23	375	38	140	53	220	29	191
Mitochondrien und Chloroplasten	138	90 (72,6 %)	30 (24,2 %)	4 (3,2 %)	14	104	34			138		138
HoloBrain	64											
Gesamt	769	360 (58,8 %)	242 (39,5 %)	10 (1,6 %)	93	613	92	140	70	495	62	433

Die Schüler:innen wurden zu ihren Vorerfahrungen mit AR befragt. Es gaben 40 % an, vorher bereits AR eingesetzt zu haben (vgl. Abb. 17). Diese Vorerfahrungen wurden zu 80 % im privaten Umfeld gemacht. Wie Tab. 8 zeigt, entsprechen die schulischen Leistungen der Schüler:innen im Fach Biologie einer Gauß'schen Normalverteilung mit Zeugnisnoten überwiegend im Bereich gut bis befriedigend. Die Leistungen der Schüler:innen unterscheiden sich zwischen den Unterrichtseinheiten zum Alzheimerkoffer und zum Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten nur geringfügig.

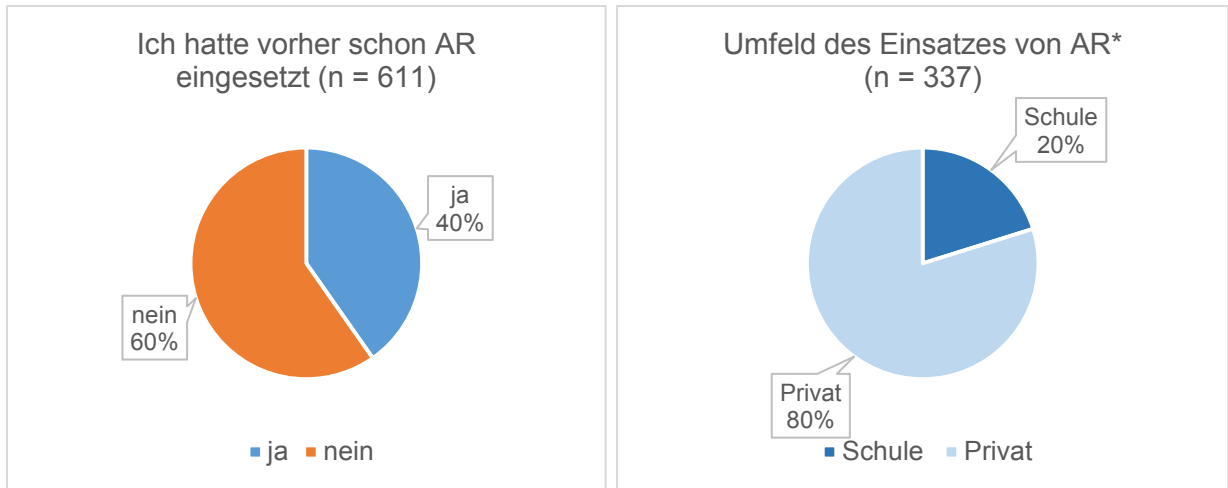


Abb. 17: Einsatzerfahrungen von Augmented Reality vor Studienbeginn (links) und Umfeld des Einsatzes von Augmented Reality (rechts). * Mehrfachnennungen möglich.

Tab. 8: Letzte Zeugnisnote im Fach Biologie. Kreuztabelle.

	1	2	3	4	5	6	Anzahl
Alzheimerkoffer	56 (17 %)	139 (42 %)	99 (30 %)	33 (10 %)	3 (1 %)	2 (1 %)	332
Mitochondrien und Chloroplasten	17 (13 %)	47 (37 %)	43 (34 %)	18 (14 %)	1 (1 %)	1 (1 %)	127
Anzahl	73 (16 %)	186 (41 %)	142 (31 %)	51 (11 %)	4 (1 %)	3 (1 %)	459

5.6 Akquise von Studienteilnehmenden und datenschutzrechtliche Aspekte

Auf Grundlage etablierter und evaluierter Unterrichtskonzepte (Alzheimerkoffer) sowie individueller Vorstellungen von Lehrkräften (Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten) wurden für die Studien eigenständige Apps programmiert. Diese digitalen Unterrichtskonzepte wurden in realen Unterrichtsszenarien, unter Wahrung der Testgütekriterien, bereits bestehenden Unterrichtskonzepten gegenübergestellt, um so die Lernwirksamkeit von AR-basiertem Biologieunterricht zu erforschen (siehe auch Kapitel 5.1).

Die Ausschreibung zur Entwicklung einer individuellen AR-basierten Lernumgebung sowie die Angebote zur Durchführung der entwickelten Unterrichtskonzepte erfolgten per E-Mail an alle rheinland-pfälzischen Gymnasien und integrativen Gesamtschulen – mit der Bitte um Bekanntgabe innerhalb des Kollegiums (Anhang 2.1.3 & 2.1.4, S. A115 f.). Bei der didaktischen Konzeption der Lehreinheiten wurde darauf geachtet, das nötige Vorwissen zur Durchführung möglichst gering zu halten. Dies bot aus Erhebungssicht den Vorteil, dass alle Teilnehmenden ähnliche Ausgangsbedingungen besaßen, wodurch sich die Vergleichbarkeit erhöht. Gleichzeitig wurde hier die Schwelle für Lehrkräfte herabgesetzt, an der Studie teilzunehmen, da die Klassen bzw. Kurse in vorangegangenen Unterrichtseinheiten nicht inhaltlich vorbereitet werden mussten. Gerade in Kombination mit der Materialbereitstellung und Durchführung vor Ort führte dies zu einer Erhöhung der potenziellen Stichprobe.

Der Konzeption der einzelnen Unterrichtseinheiten lagen zwar 45 Minuten zugrunde, jedoch mussten aufgrund der Datenerhebung weitere 45 Minuten eingeplant werden, sodass dafür nur Doppelstunden infrage kamen. Zur Durchführung der Studie an Schulen zwecks Datenerhebung liegen strenge datenschutzrechtliche Bestimmungen vor, die in enger Zusammenarbeit mit der Aufsichts- und Dienstleistungsdirektion abgestimmt wurden (Anhang 2.1.1, S. A109 f.). Zudem wurde ein Informationsschreiben für die Schulleitung, teilnehmende Lehrkräfte, Eltern und Erziehungsberechtigte sowie Schüler:innen erstellt. Die Informationen zur Studie inkl. Ablauf, Projektbeschreibung und Hinweisen zur Datenerhebung, -aufbewahrung und -vernichtung wurden mit den Einverständniserklärungen (Anhang 2.1.2, S. A112 f.) nach Terminvereinbarung an die teilnehmenden Schulen gesendet.

Die Durchführung der einzelnen Erhebungen fand in den Klassen- bzw. Fachsälen der teilnehmenden Schulen statt. Das Unterrichtsmaterial wurde den Schüler:innen bereitgestellt und, sofern möglich, im Sinne der Nachhaltigkeit wiederverwendet oder digitalisiert. Vor Ort konnte auf Beamer und Projektionsfläche zurückgegriffen werden.

5.7 Organisatorischer Rahmen der Tests und Befragungen

Zu Beginn jeder Erhebung erfolgte für alle Studien ein informierender Einstieg mittels PowerPoint-Folien (Anhang 1.1.1, S. A1 f.; Anhang 1.2.1, S. A88 f.). Diese enthielten Informationen über den organisatorischen Rahmen, die Verwendung der Tablets sowie die Datenerhebung auf dem Tablet, mit dem der CL, die UX und – im Fall der HoloBrain-Studie – zusätzlich die Immersion erfasst wurden.

Nach dem Post-Test wurde eine Abschlussbefragung durchgeführt, in der neben demografischen Parametern die ELU, der CL und die UX der eingesetzten App erfasst wurden. Zusätzlich war es den Teilnehmenden freigestellt, Verbesserungsvorschläge für die App als Freitext einzutragen. Das Kreuzdesign erlaubte einerseits die gleichzeitige Bearbeitung eines LS mit zwei unterschiedlichen medialen Umsetzungen und andererseits erhöhte es die Stichprobe, da alle Teilnehmenden sowohl mit AR als auch mit den Kontrollmedien arbeiteten. Die detaillierte Erhebungsstruktur der einzelnen Studien ist in Abb. 18 dargestellt.

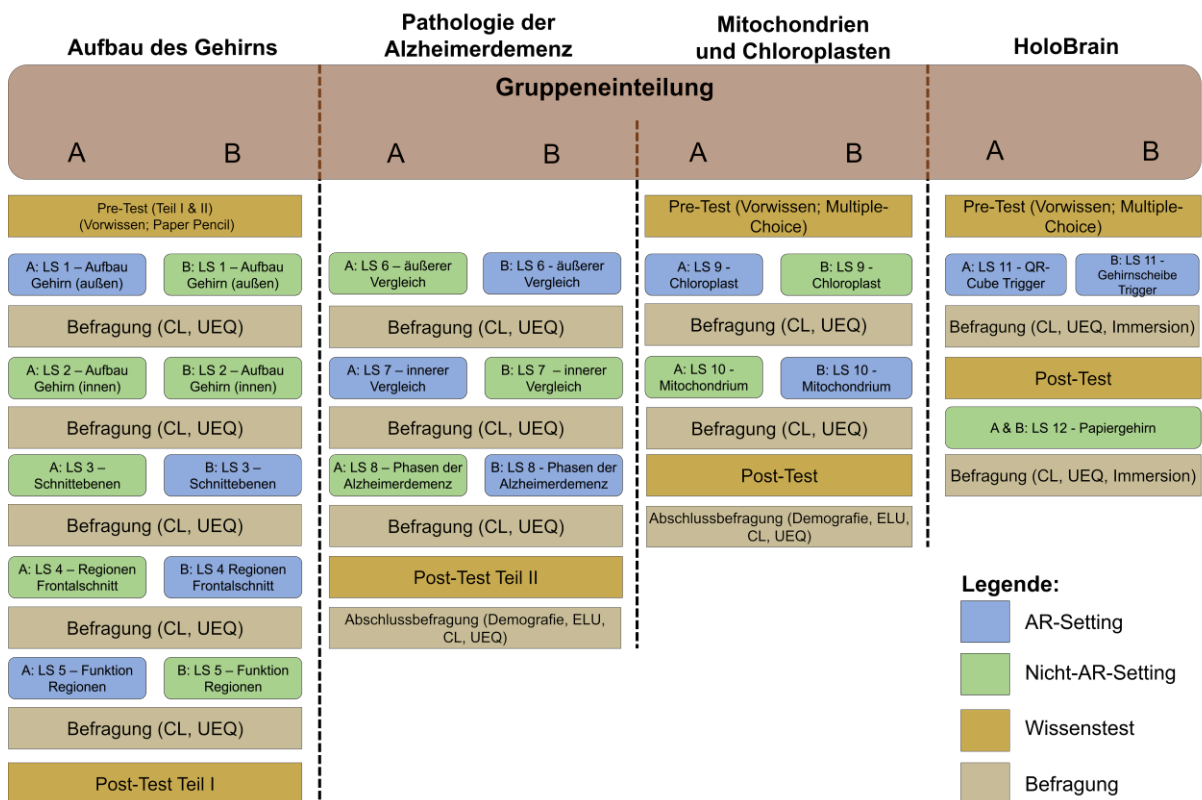


Abb. 18: Erhebungsstruktur der einzelnen Studien.

5.8 Beschreibung der Lernsettings

Während in Kapitel 5.7 ein Überblick über den organisatorischen Ablauf der Studien, insbesondere über die Struktur und die Zeitpunkte der Tests und Fragebögen, gegeben wurde, liegt der Fokus im Folgenden auf der Beschreibung der einzelnen LS. Im Fall der Unterrichtseinheiten zum Alzheimerkoffer existieren neben studienrelevanten Aufgaben auch solche Aufgaben, in denen kein Medienvergleich stattfindet. Letztere dienen in erster Linie dazu, die inhaltliche Stringenz der Unterrichtsstunden zu wahren. Um die studienrelevanten Aufgaben von den nicht studienrelevanten Aufgaben abzuheben, werden erstere als *LS* bezeichnet. Für klare Referenzen wird diese Nomenklatur für die weiteren Studien zum Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten sowie zur HoloBrain-App beibehalten. Die inhaltlichen Beschreibungen der LS sowie deren mediale Umsetzung (AR und Kontrolle) gehen aus Tab. 9 (Alzheimerkoffer), Tab. 10 (Aufbau Mitochondrien und Chloroplasten) sowie Tab. 11 (HoloBrain-App) hervor. Da nicht nur ein valider Vergleich zwischen der medialen Umsetzung bestehen muss, sondern auch die Aufgaben in den Pre- und Post-Tests die Testgütekriterien erfüllen müssen, sind die den LS entsprechenden Testaufgaben als Referenz in den folgenden Tabellen angegeben.

Tab. 9: Beschreibung einzelner Lernsettings (LS) für die Unterrichtseinheiten des Alzheimerkoffers. Inhaltliche Beschreibung der LS sowie deren mediale Augmented-Reality(AR)- und etablierte Unterrichtsmedien(EUM)-Umsetzung. Referenzen zu äquivalenten Aufgaben der Pre- und Post-Tests.

Lernsetting	Inhalt	AR-Umsetzung	EUM-Umsetzung	Pre-/Post-Test <small>Anhang 2.2.1, S. A136 f.</small>
LS 1	Äußerer Aufbau Gehirn a) Grenzen Gehirnregionen erkennen b) Strukturen zur Aufteilung nennen c) Gehirnregionen einzeichnen und beschriften	Projektion des 3D-Gehirns auf Modell; Nachfahren der Grenzen mit Finger (Interaktion Virtualität und Realität, kein Split-Attention-Effekt); Einblenden der Informationen on Demand via Virtual Buttons; Beschriftung wird eingeblendet (Anhang 1.1.6, S. A52)	Abbildungen von farbigem 3D-Gehirn inkl. Beschriftung; Identifizieren der Regionen am Realmodell (Split-Attention-Effekt); Informationen nicht on Demand, sondern alle direkt zugänglich (Anhang 1.1.7, S. A64)	A1, A2
LS 2	Innerer Aufbau Gehirn (Parasagittalschnitt)	Beide Gruppen EUM	Textbasiertes Lernen; Gehirnregionen mittels Informationsexzerpt aus Text benennen; <u>nur Sek I</u> : Antworten teilweise vorgegeben (Buchstabenlücken) (Anhang 1.1.6, S. A53)	A4
LS 3	Schnittebenen (Frontal- und Parasagittalschnitt)	Projektion des 3D-Modells (halbtransparent) auf gesunde Gehirnscheibe; durch Bewegen der Scheibe lässt sich Schnittebene identifizieren (Anhang 1.1.7, S. A66)	Gesunde Gehirnscheibe an Realmodell ausrichten (Modell auseinanderbauen erlaubt), um Schnittebene zu identifizieren (Anhang 1.1.6, S. A54)	A3

Fortsetzung Tab. 9

LS 4	<p>Innerer Aufbau Gehirn</p> <p>a) Schläfen- und Stirnlappen einzeichnen</p> <p>b) Graue und weiße Substanz einzeichnen</p> <p>c) Hippocampus und Ventrikel einzeichnen</p>	<p>a) 3D-Gehirn auf Abbildung der Scheibe; Einzeichnen der Region (kein Split-Attention-Effekt)</p> <p>b) Projektion MRT auf Abbildung; App als Einzeichnenhilfe</p> <p>c) App zur Binnendifferenzierung/ Lösungsüberprüfung (Anhang 1.1.7, S. A67)</p>	<p>a) Abbildungen von farbigem 3D-Gehirn (M1_B), um Bereiche einzeichnen</p> <p>b) Mithilfe von Texthilfe und Abb. in M3_B graue und weiße Substanz einzeichnen (Split-Attention-Effekt)</p> <p>c) Hilfekarte zur Binnendifferenzierung/ Lösungsüberprüfung (Split-Attention-Effekt) (Anhang 1.1.6, S. A55)</p>	A5
LS 5	<p>Gehirnregionen Funktionen zuordnen</p>	<p>Projektion 3D-Gehirnmodelle (Areale, Funktionen, Limbisches System) auf Trigger (kein Bezug Realität und Virtualität); Funktionen in Tabelle eintragen (Anhang 1.1.6, S. A56)</p>	<p>Informationen aus Text exzerpieren und in Tabelle eintragen; den Gehirnregionen zuordnen (Anhang 1.1.7, S. A68)</p>	A6
LS 6	<p>Äußerer Vergleich Realmodelle auf Veränderungen</p>	<p>Projektion der Hirnfurchung auf Realmodell (Furchen beim Alzheimermodell breiter dargestellt), Bedienung via Virtual Buttons (Anhang 1.1.7, S. A70)</p>	<p>Screenshot von App mit Hirnfurchen über den Realmodellen zur Lösung der Aufgabe (Anhang 1.1.6, S. A58)</p>	A7

Fortsetzung Tab. 9

LS 7	Innerer Vergleich MRT-Bilder	Projektion der MRT-Daten auf Gehirnscheiben; Vergleich bekannter Regionen auf Veränderungen (Anhang 1.1.6, S. A58)	MRT-Bilder als Abbildungen; Vergleich bekannter Regionen auf Veränderungen (Anhang 1.1.7, S. A70)	A8
LS 8	Phasen der Alzheimer-Demenz	Projektion der Phasen auf gesunde Gehirnscheibe (Rückseite); Ändern der Phase mittels Slider (Change-Detection-Task, kein Split-Attention-Effekt), Veränderungen in Tabelle beschreiben (Anhang 1.1.7, S. A71)	Abbildung mit unterschiedlichen Phasen der Alzheimer-Demenz; Identifizierung der Veränderungen durch Bildervergleich (Split-Attention-Effekt); Veränderungen in Tabelle beschreiben (Anhang 1.1.6, S. A59)	A9

Tab. 10: Beschreibung einzelner Lernsettings (LS) für Unterrichtseinheit zum Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten. Inhaltliche Beschreibung der LS sowie deren mediale Augmented-Reality(AR)- und Nicht-AR-Umsetzung. Referenzen zu äquivalenten Aufgaben der Pre- und Post-Tests.

Lernsetting	Inhalt	AR-Umsetzung	Nicht-AR-Umsetzung	Pre-/Post-Test
		Anhang 1.2.2, S. A95	Anhang 1.2.2, S. A95	Anhang 2.3.1, S. A146 f.
LS 9	Aufbau von Chloroplasten	Projektion 3D-Chloroplasten-Modell auf Trigger-Bild (2D-Abbildung Chloroplast, auf Pappe, Abmessungen ca. 15 x 7 cm); Beschriftung einzeln zuschaltbar	Darstellung 3D-Chloroplasten-Modell auf Tablet-Display; Rotation und Skalierung mittels Touch-Gestensteuerung; Beschriftung einzeln zuschaltbar	A1, A2, A4, A6, A8, A10, A12
LS 10	Aufbau von Mitochondrien	Projektion 3D-Mitochondrien-Modell auf Trigger-Bild (2D-Abbildung Mitochondrium, auf Pappe, Abmessungen ca. 15 x 7 cm); Beschriftung einzeln zuschaltbar	Darstellung 3D-Mitochondrien-Modell auf Tablet-Display; Rotation und Skalierung mittels Touch-Gestensteuerung; Beschriftung einzeln zuschaltbar	A2, A3, A4, A5, A7, A9, A11

Tab. 11: Beschreibung einzelner Lernsettings (LS) der Detailstudie *HoloBrain-App*. Inhaltliche Beschreibung des LS sowie dessen mediale Augmented-Reality(AR)- und etablierte Unterrichtsmedien(EUM)-Umsetzung. Referenzen zu äquivalenten Aufgaben der Pre- und Post-Tests.

Lernsetting	Inhalt	AR-Umsetzung	EUM-Umsetzung	Pre-/Post-Test
LS 11	Äußerer Aufbau des menschlichen Gehirns	<p>QR-Cube: Projektion des natürlichen und farbigen 3D-Gehirn-Modells (opaque) auf QR-Cube; durch Bewegen des QR-Cubes Betrachtung aus allen Blickwinkeln möglich; Beschriftung einschaltbar (Anhang 1.3.2, S. A106)</p> <p>Gehirnscheibe: Projektion des natürlichen und farbigen 3D-Gehirn-Modells (opaque) auf gesunde Gehirnscheibe; durch Bewegen der Gehirnscheibe Betrachtung aus fast allen Blickwinkeln möglich, sofern Gehirnscheibe nicht senkrecht zur Kamera steht; Beschriftung einschaltbar (Gehirnscheibe aus Alzheimerkoffer)</p>	Papiermodell Gehirn mit äußerer Beschriftung und farbiger Hervorhebung der Gehirnregionen auf der linken Hemisphäre; Abmessungen ca. 10 x 8 x 9 cm (Anhang 1.3.3, S. A107)	Anhang 2.4.1, S. A149 f. A1, A2

5.9 Testinstrumente

Zur Erfassung lernrelevanter Daten wurden in den Studien unterschiedliche Ansätze verfolgt. Die Daten der Testinstrumente wurden sachlogisch miteinander verknüpft, um allgemeingültige Aussagen über die Lernwirksamkeit verschiedener Medien und Steuerungsmethoden treffen zu können. Im Rahmen der Studie wurden durch subjektive Fragebögen Daten zum CL, zur UX, zur Immersion sowie zur ELU erhoben. Darüber hinaus geben die Ergebnisse des Pre- und Post-Tests Aufschluss über den LZ der Teilnehmenden.

5.9.1 Statistische Datenauswertung

Die im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Daten wurden mit den Programmen Microsoft Excel, SPSS 27 und R aufbereitet und ausgewertet. Zur Untersuchung von Gruppenunterschieden wurden in SPSS 27 parametrische Testverfahren (gepaarter und ungepaarter t-Test, MANOVA) sowie nicht parametrische Testverfahren (Mann-Whitney-U- und Wilcoxon-Test) genutzt. Vor der Durchführung dieser statistischen Mittelwertvergleiche wurden stets die Voraussetzungen und Annahmen zur Durchführung parametrischer Mittelwertvergleiche überprüft. In Fällen, in denen die Stichprobe $n > 50$ betrug und der Shapiro-Wilk-Test Signifikanz anzeigte (und damit keine Normalverteilung), wurden aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes und der Tendenz zur Signifikanz des Shapiro-Wilk-Tests bei größeren Stichproben nach Bortz und Schuster (2016), Kähler (2004) sowie Tavakoli (2013) parametrische Testverfahren zum Vergleich angewendet. Dieses Vorgehen wurde in entsprechenden Fällen nochmals mittels grafischer Analyse (Histogramm und QQ-Plot) auf Normalverteilung sowie nicht parametrischer Testverfahren (Mann-Whitney-U- und Wilcoxon-Test) abgesichert. Ergaben sich hierbei Konflikte hinsichtlich der Signifikanz, wird ausdrücklich im Ergebnisteil darauf hingewiesen.

Weiterhin wurden Hauptkomponentenanalysen als multivariate statistische Testverfahren zur Datenreduktion in SPSS 27 genutzt. Dabei wurden die allgemeinen Voraussetzungen – lineare Beziehung der Variablen, keine Ausreißer, ausreichende Stichprobengröße – beachtet und diese werden in den entsprechenden Kapiteln der vorliegenden Arbeit (5.9.2, 5.9.4) detailliert dargelegt. Passend zur Datenstruktur wurden sowohl Varimax als auch Oblimin als Rotationsverfahren eingesetzt.

Zur weiteren Absicherung hinsichtlich der Validität der eingesetzten Messinstrumente und zur Überprüfung der theoretischen Strukturen der Fragebögen (CLT, UEQ, ELU) wurden, sofern die Voraussetzungen gegeben waren, konfirmatorische Faktorenanalysen in R in Kombination mit dem Zusatzmodul lavaan durchgeführt (vgl. Kapitel 5.9.2, 5.9.3, 5.9.4). Zur weiteren Aufklärung und in Fällen, in denen die Voraussetzungen für die konfirmatorische

Faktorenanalyse nicht gegeben waren, wurde die Reliabilität der Skalen mithilfe von Cronbach's Alpha überprüft. Die Ergebnisse dieser Analysen waren Ausgangspunkt von Zusammenhangsanalysen wie der Strukturgleichungsmodellierung (vgl. Kapitel 6.2.1, 6.3.1, 6.4.1), der multiplen linearen Regression (vgl. Kapitel 6.2.2, 6.5.1), der MANOVA (vgl. Kapitel 6.3.2) und der Pearson-Produkt-Moment-Korrelation (vgl. Kapitel 6.4.2). Mit Ausnahme der Strukturgleichungsmodellierung, die ebenfalls in R durchgeführt wurde, erfolgten die Zusammenhangs- und Reliabilitätsanalysen in SPSS 27. Die notwendigen Annahmen und Voraussetzungen der einzelnen statistischen Testverfahren werden in den entsprechenden Kapiteln detailliert erläutert.

Als weiteres Analysewerkzeug wurde das von Schrepp (2018a) entwickelte UEQ-Data-Analysis-Tool genutzt, das auf Grundlage einer Stichprobengröße von $n = 20\,190$ einen Benchmark-Vergleich der eingesetzten Apps mit anderen digitalen Produkten ermöglicht (vgl. Kapitel 6.3.1, 6.3.2, 6.3.3). Das UEQ-Data-Analysis-Tool basiert auf Microsoft-Excel-Funktionen und wird neben dem Benchmark-Vergleich zur Prüfung auf Inkonsistenzen im Antwortverhalten der Probanden eingesetzt. Inkonsistenzen treten nach Schrepp (2016) in Fällen auf, bei denen die Differenz aus der niedrigsten und der höchsten Antwort innerhalb einer Dimension mehr als drei beträgt. Trat dies in mehr als zwei der sechs Dimensionen auf, wurde der Fall für weitere Analysen als Ausreißer ausgeschlossen.

5.9.2 Cognitive-Load-Theory

Basierend auf den in Kapitel 2.3 erläuterten theoretischen Grundlagen der CLT bietet die quantitative und qualitative Messung des CL ein breites Forschungsfeld. Hierzu existieren unterschiedliche Methoden und Ansätze. Das Messspektrum reicht von physiologischen Indizes über sekundäre Aufgaben und Messgrößen sowie subjektive Messgrößen bis hin zu verbalen Berichten und Interviews (Chandler, 2018, S. VIII). Jede der vorangegangenen Messmethoden bietet Vorteile und Limitationen gegenüber den anderen, sodass die Auswahl nach dem konkreten Anwendungsfall erfolgen muss.

Während physiologische Messungen, bspw. elektroenzephalographische Messungen, vielversprechende Ergebnisse liefern, ist deren Einsatz in realen Unterrichtsszenarien nur schwer umsetzbar. Andere physiologische Messverfahren sind die Erfassung der Pupillendilatation oder der Herzfrequenz sowie das Eye-Tracking (Ayres, 2018, S. 16). Diese bieten den Vorteil, dass sie Aufschluss über den CL während der Bearbeitung des LS liefern und dadurch den Lernprozess besser auflösen können, jedoch ist eine Aufschlüsselung in die einzelnen Loads nicht möglich. Weiterhin haben Vergleichsstudien von Paas und van Merriënboer (1994) gezeigt, dass mithilfe von subjektiven Fragebögen eine bessere Differenzierung des CL erreicht werden kann, da bei physiologischen Messungen

(Herzfrequenz) nur zwischen mental aktiven und mental nicht aktiven Phasen unterschieden werden kann. Während die subjektive Ratingskala von Paas und van Merriënboer (1994) den summierten CL misst, entwickelten Leppink et al. (2013) ein erweitertes Messinstrument, bei dem zwischen den unterschiedlichen CL (ICL, ECL, GCL) unterschieden wird. Dabei wurden ebenfalls vorhandene Ratingskalen von Paas (1992), Ayres (2006), Salomon (1984) und Cierniak et al. (2009) berücksichtigt.

Die Items wurden aus dem Englischen ins Deutsche übersetzt, thematisch angepasst und, um Übersetzungsfehler auszuschließen, von einer unabhängigen Person zurück ins Deutsche übersetzt (vgl. Tab. 12). Um die erhobenen Daten mit den Ergebnissen von Leppink et al. (2013) vergleichen zu können, wurde die zehnstufige, endpunktbenannte Likert-Skalierung beibehalten. Ebenso wurde mit den klassischen Items von Paas (1992), Ayres (2006), Salomon (1984) und Cierniak et al. (2009) verfahren, bei denen es sich um neunstufige, verbalisierte Likert-Skalen handelt. Während die Formulierung der vier klassischen Items allgemeingültig ist und die Items damit einhergehend ein breites Anwendungsfeld ergeben, weisen die von Leppink et al. (2013) aufgestellten Items in ihrer Formulierung einen engen Bezug zum Inhalt der Studie auf. Daher musste bei der Übersetzung ins Deutsche ebenfalls darauf geachtet werden, dass der inhaltliche Bezug zu den in Kapitel 5.8 beschriebenen LS hergestellt wird. Um einen engeren Bezug zur Studie und zum Sprachgebrauch der Schüler:innen zu erreichen, wurde daher *activity* nicht wörtlich mit *Aktivität* oder *Tätigkeit* übersetzt, sondern mit dem Wort *Aufgabe* (vgl. Tab. 12, Items i1–i3).

Weiterhin wurde bei Leppink et al.s (2013) der CL in einem mathematischen Kontext (Formeln, Definitionen und Konzepte) erforscht. Dies machte eine Anpassung der Frageitems i2, i3, i8, i9, i10 und i11 für die Biologie notwendig, damit ein inhaltlich-kontextueller Bezug hergestellt wurde. Es wurden besonders die Frageitems i8 und i10 an den Inhalt des jeweiligen LS angepasst (vgl. Tab. 13). Darüber hinaus wurde die in Frageitem i9 verwendete Formulierung *understanding of statistics*, aus den oben genannten Gründen, mit *Verständnis der Biologie* übersetzt. Ferner beziehen sich die ursprünglichen Frageitems des ECL auf *instructions and/or explanations*. Da jedoch im Kontext der hier beschriebenen Studien nicht nur *Aufgabenstellung und Erläuterungen* als wesentliche Faktoren für den ECL angesehen werden können (vgl. Kapitel 2.3), wurden die bestehenden Frageitems (i4–i6) durch die Formulierung *Aufgabenstellungen, Materialien und Informationen* angepasst und der Fragebogen wurde um ein weiteres Frageitem (i7) mit direktem Bezug zu den *Informationen in der App* bzw. den *Informationen in den Materialien* ergänzt.

Tab. 12: Cognitive Load: Frageitems zur Erfassung des Cognitive Load im englischen Original (nach Leppink et al., 2013, S. 1070) sowie die Anpassungen und Übersetzungen ins Deutsche.

Itemcode	Dimension Cognitive Load	Originalitem	Deutsche Übersetzung
i1	ICL	The topic/topics covered in the activity was/were very complex.	Das Thema der Aufgabe an sich war sehr komplex.
i2	ICL	The activity covered formulas that I perceived as very complex.	Die Inhalte der Aufgabe waren sehr kompliziert.
i3	ICL	The activity covered concepts and definitions that I perceived as very complex.	Die in der Aufgabe behandelten Zusammenhänge und Begriffe empfand ich als schwierig.
i4	ECL	The instructions and/or explanations during the activity were very unclear.	Die Aufgabenstellungen, Materialien und Informationen waren schwer zu verstehen.
i5	ECL	The instructions and/or explanations were, in terms of learning, very ineffective.	Die verwendeten Aufgabenstellungen, Materialien und Informationen waren für das Lernen sehr nutzlos.
i6	ECL	The instructions and/or explanations were full of unclear language.	Die Aufgabenstellungen, Materialien und Informationen waren sprachlich sehr unklar.
i7	ECL	-	Die Informationen in der App/in den Materialien waren sehr verwirrend dargestellt.
i8	GCL	The activity really enhanced my understanding of the topic(s) covered.	Die Aufgabe verbessert mein Wissen über [Inhalt des LS, vgl. Tab. 13, S. 116].
i9	GCL	The activity really enhanced my knowledge and understanding of statistics.	Die Aufgabe verbessert mein Verständnis der Biologie.
i10	GCL	The activity really enhanced my understanding of the formulas covered.	Die Aufgabe verbessert mein Verständnis über [Inhalt des LS, vgl. Tab. 13, S. 116].
i11	GCL	The activity really enhanced my understanding of concepts and definitions.	Die Aufgabe verbessert mein Verständnis der behandelten Themen.
i12	CL (Paas, 1992)	In the lecture that just finished I invested 1. very, very low mental effort / 2. very low mental effort / 3. low mental effort / 4. rather low mental effort / 5. neither low nor high mental effort / 6. rather high mental effort / 7. high mental effort/ 8. very high mental effort / 9. very, very high mental effort	In der gerade beendeten Aufgabe investierte ich ... 1. sehr, sehr wenig geistige Anstrengung/ 2. sehr wenig geistige Anstrengung/ 3. wenig geistige Anstrengung/ 4. eher niedrige geistige Anstrengung/ 5. weder wenig noch hohe geistige Anstrengung/ 6. eher hohe geistige Anstrengung/ 7. hohe geistige

Fortsetzung Tab. 12

			Anstrengung/ 8. sehr hohe geistige Anstrengung
i13	ICL (Ayres, 2006)	The lecture that just finished was 1. very, very easy / 2. very easy / 3. easy / 4. rather easy / 5. neither easy nor difficult / 6. rather difficult / 7. difficult / 8. very difficult / 9. very, very difficult	Die gerade beendete Aufgabe war ... 1. sehr, sehr einfach/ 2. sehr einfach/ 3. einfach/ 4. eher einfach/ 5. weder einfach noch schwierig/ 6. eher schwierig/ 7. schwierig/ 8. sehr schwierig/ 9. sehr, sehr schwierig
i14	ECL (Cierniak et al., 2009)	To learn from the lecture was 1. very, very easy / 2. very easy / 3. easy / 4. rather easy / 5. neither easy nor difficult / 6. rather difficult / 7. difficult / 8. very difficult / 9. very, very difficult	Von der Aufgabe etwas zu lernen war ... 1. sehr, sehr einfach/ 2. sehr einfach/ 3. einfach/ 4. eher einfach/ 5. weder einfach noch schwierig/ 6. eher schwierig/ 7. schwierig/ 8. sehr schwierig/ 9. sehr, sehr schwierig
i15	GCL (Salomon, 1984)	How much did you concentrate during the lecture? 1. very, very little / 2. very little / 3. little / 4. rather little / 5. neither little nor much / 6. rather much / 7. much / 8. very much / 9. very, very much	Wie sehr warst du während der Aufgabe konzentriert? 1. sehr, sehr wenig/ 2. sehr wenig/ 3. wenig/ 4. eher wenig/ 5. weder wenig noch viel/ 6. eher viel/ 7. viel/ 8. sehr viel/ 9. sehr, sehr viel

Tab. 13: Formulierungsanpassungen der Testitems i7 und i9 des Fragebogens zur Erfassung des Cognitive Load entsprechend dem jeweiligen Lernsetting und der Studie.

LS	Die Aufgabe verbessert mein Wissen über ...
1	den äußeren Aufbau des Gehirns
2	den inneren Aufbau des Gehirns
3	die Schnittebenen
4	den inneren Aufbau des Gehirns
5	die Funktionen des Gehirns
6	die äußeren Veränderungen des Gehirns
7	die inneren Veränderungen des Gehirns
8	die Phasen der Alzheimer-Demenz
9	den Aufbau von Chloroplasten
10	den Aufbau von Mitochondrien
11	den äußeren Aufbau des Gehirns

Hauptkomponentenanalyse des Cognitive-Load-Theory-Fragebogens

Zwecks Dimensionsreduktion und zur Abschätzung der Reliabilität durch Berechnung der internen Konsistenz der nach Leppink et al. (2013) adaptierten Frageitems (vgl. Tab. 12, i1–i11) wurden die Daten zunächst einer Hauptkomponentenanalyse in SPSS 27 unterzogen. Aufgrund der umfangreichen Stichprobengröße wurden hierzu die erhobenen Daten zum Alzheimerkoffer herangezogen. Da während der Studie der Fragebogen für jedes LS separat ausgefüllt wurde, wurde zur Datenaufbereitung zunächst der Mittelwert für jedes Frageitem

(LS1–LS8) berechnet. Die Analyse der berechneten Daten zeigte für das Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterium (KMO) und den Bartlett-Test sehr gute Werte (KMO: .898; $X^2(55) = 3994$, $p < .001$), sodass die Voraussetzungen für die Hauptkomponentenanalyse erfüllt waren. Die Überprüfung des Scree-Plots unter Berücksichtigung der theoretischen Grundlagen der CLT rechtfertigte die Extraktion von 3 Komponenten, die 82,8 % der Varianz erklären.

Ausgehend von den bestehenden Studien zur Messung des CL (Leppink et al., 2013; 2014) wurden ebenfalls eine Drei-Faktor-Lösung sowie Interkorrelationen zwischen den Komponenten erwartet. Um diese Interkorrelationen der Faktoren zu berücksichtigen, die sich auch in der Korrelationsmatrix in Tab. 15 zeigen, wurde die Oblimin-Rotation verwendet. Die Faktorladungen sowie die interne Konsistenz für die einzelnen Komponenten sind in Tab. 14 dargestellt. Die Items für den ECL laden auf den ersten Faktor, die Items für den GCL laden auf den zweiten Faktor und die Items für den ICL laden auf den dritten Faktor.

Tab. 14: Cognitive Load: Faktorladungen und interne Konsistenz (Cronbach's Alpha) per Faktor.

Faktor/Item	Ladung	Alpha
K1: ECL		.894
Item 4	.875	
Item 5	.877	
Item 6	.796	
Item 7	.913	
K2: GCL		.928
Item 8	.922	
Item 9	.855	
Item 10	.947	
Item 11	.919	
K3: ICL		.893
Item 1	-.827	
Item 2	-.942	
Item 3	-.829	

Tab. 15: Cognitive Load: Korrelationen zwischen den Faktoren.

Faktorpaarungen	Korrelation
ICL – ECL	-.540
ICL – GCL	-.080
ECL – GCL	-.415

Konfirmatorische Faktorenanalyse des Cognitive-Load-Theory-Fragebogens

Weiterhin wurde eine konfirmatorische Faktorenanalyse in R durchgeführt, um zu überprüfen, inwieweit die ursprünglich von Paas (1992), Ayres (2006), Salomon (1984) und Cierniak et al.

(2009) entwickelten Items in das von Leppink et al. (2013) entwickelte Messinstrument integriert werden können. Es wurde vermutet, dass das Item i12 von Paas (1992) den gesamten CL erfasst und somit auf alle drei Faktoren lädt, das Item i13 von Ayres (2006) auf den ICL lädt, das Item i14 von Cierniak et al. (2009) auf ECL und das Item i15 von Salomon (1984) auf den GCL lädt. In Tab. 16 sind die Mittelwerte, die Standardabweichung, die Schiefe, die Kurtosis sowie die quadrierten multiplen Korrelationen (R^2) der Frageitems dargestellt. Bei R^2 handelt es sich um einen Indikator für die Item-Reliabilität, der idealerweise Werte $> .26$ aufweisen sollte (Cohen, 1988, S. 412 ff.).

Tab. 16: Cognitive Load: Mittelwerte, Standardabweichung, Schiefe, Kurtosis und quadrierte multiple Korrelation R^2 der einzelnen Items in der Studie zum Alzheimerkoffer (n = 388).

Faktor/Item	Mittelwert	SD	Schiefe	Kurtosis	R^2
Items adaptiert nach Leppink et al (0–10)					
Item 1	2.24	1.54	.82	1.02	.855
Item 2	2.55	1.71	.84	1.03	.505
Item 3	2.17	1.51	.94	1.70	.841
Item 4	1.46	1.40	1.14	1.44	.649
Item 5	2.02	1.43	.85	.99	.779
Item 6	1.93	1.54	.97	1.86	.525
Item 7	2.25	1.46	.83	1.62	.685
Item 8	7.23	1.64	-.63	.66	.909
Item 9	5.95	1.97	-.22	.02	.478
Item 10	6.69	1.74	-.47	.24	.872
Item 11	7.11	1.65	-.59	.49	.962
Ursprüngliche Items (1–9)					
Item 12 (Paas) GA	4.01	1.13	-.09	-.15	.380
Item 13 (Ayres) SA	3.73	1.02	.13	.90	.546
Item 14 (Cierniak) LE	3.52	1.00	-.08	.43	.536
Item 15 (Salomon) KZ	4.57	1.20	-.19	.53	.007

Aufgrund der ordinalskalierten Daten sowie der Verteilung (siehe Schiefe und Kurtosis in Tab. 16) wurde der Weighted-least-Square-Mean-and-Variance-Schätzer zur konfirmatorischen Faktorenanalyse herangezogen (Li, 2016; Suh, 2015). Diese Faktorenanalyse zeigte für das beschriebene Messmodell einen moderaten Model-Fit ($n = 392$, $X^2(87) = 405.82$, $p = .00$, CFI = .918, TLI = .901, RMSEA = .097, SRMR = .125). Ausgehend von den R^2 -Werten in Tab. 16 sowie den Faktorladungen und Residualwerten aus Abb. 19 weichen besonders die klassischen Items i12 von Paas (1992), i13 von Ayres (2006), i14 von Cierniak et al. (2009) und i15 von Salomon (1984) von den übrigen Items ab. Besonders stark lädt i12 auf ICL (1.07), negativ lädt es auf den ECL (-.64) und nicht auf den GCL (.01). Während die Items i13 von Ayres (2006) und i14 von Cierniak et al. (2009) moderat auf den ICL (i13: .74) und den ECL (i14: .73) laden, lädt das Item i15 von Salomon (1984) nur gering auf den Faktor GCL (.09).

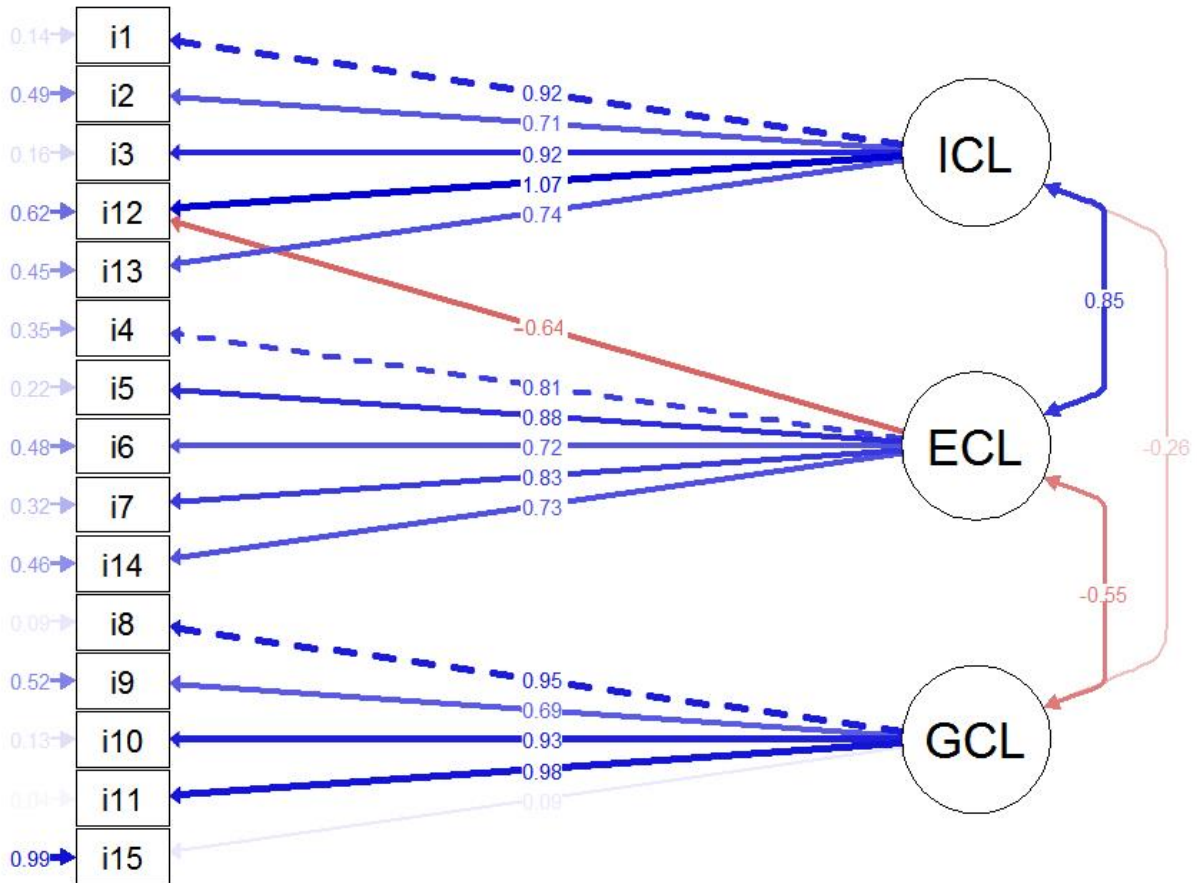


Abb. 19: Cognitive Load: Pfaddiagramm der konfirmatorischen Faktorenanalyse aller Items (i1–i15). Residualwerte, standardisierte Faktorladungen sowie Interkorrelationen der Faktoren.

Aufgrund der niedrigen Faktorladung (i15), des hohen Residualwerts (i15) und der Querladung auf zwei Faktoren (i12) wurden die Items i12 und i15 vor einer Wiederholung der konfirmatorischen Faktorenanalyse ausgeschlossen. Durch diese Maßnahme konnte ein guter Model-Fit ($n = 392$, $X^2(62) = 74,55$, $p = .132$, $CFI = .996$, $TLI = .995$, $RMSEA = .023$, $SRMR = .069$) identifiziert werden. Das finale Modell inklusive der Residualwerte, der Faktorladungen sowie der Interkorrelationen der Faktoren ist in Abb. 20 dargestellt.

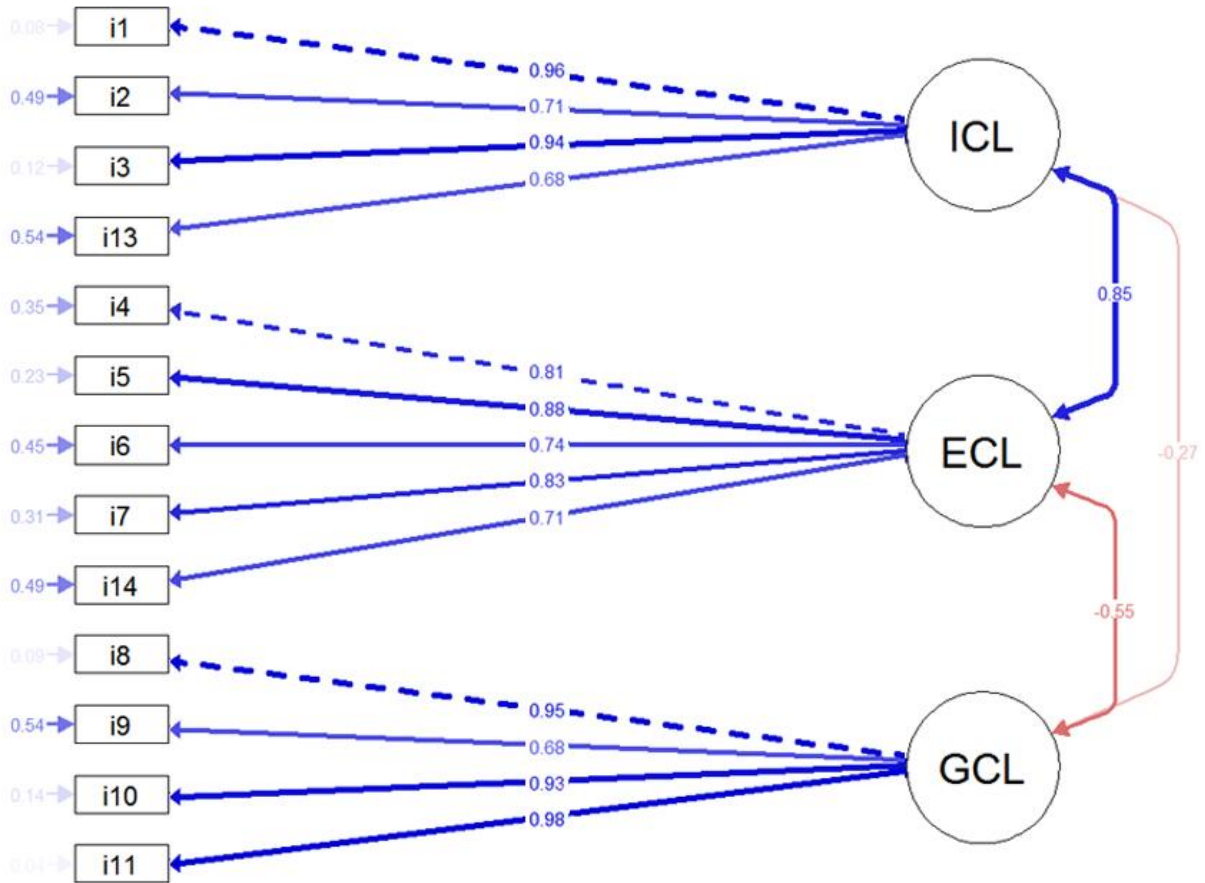


Abb. 20: Cognitive Load: Pfaddiagramm der konfirmatorischen Faktorenanalyse ausgewählter Items. Residualwerte, standardisierte Faktorladungen sowie Interkorrelationen der Faktoren.

5.9.3 User-Experience-Questionnaire

Bei dem UEQ handelt es sich um einen von Laugwitz et al. (2008) sowie Schrepp et al. (2014) entwickelten Fragebogen zur Erfassung der UX, der derzeit in 36 Sprachen verfügbar ist. „Der UEQ ist besonders für Produkte geeignet, mit denen Nutzer Aufgaben abarbeiten oder beruflich tätig sind.“ (Schrepp, 2018b, S. 36) Der Fragebogen ermöglicht es, zwei konkrete Produkte bzw. verschiedene Versionen eines Produkts hinsichtlich der UX zu vergleichen und darüber hinaus den Vergleich mit anderen externen digitalen Produkten (Benchmark-Vergleich) herzustellen. Der momentane Datensatz des Benchmark-Vergleichs enthält 452 Produktevaluationen mit einer Stichprobengröße von $n = 20190$ (Schrepp, 2019). Über die Einordnung und Interpretation der Ergebnisse im Zuge des Benchmark-Vergleichs gibt Tab. 17 Auskunft.

Die Struktur des UEQ ist in Abb. 21 dargestellt. Sie besteht aus sechs Dimensionen (blau), die sich zum Teil in pragmatische und hedonische Qualitätskriterien (orange) differenzieren lassen. Unter pragmatische Qualität fallen „Kriterien, die sich darauf beziehen, wie gut Benutzer ihre Aufgaben mit dem Produkt bearbeiten können“ (Schrepp, 2018b, S. 5), wohingegen hedonische Qualitätskriterien Aspekte der UX in den Fokus stellen, die nicht direkt an die Aufgabenbearbeitung geknüpft sind. Da die einzelnen Dimensionen bereits in Kapitel 2.5 ausführlich erläutert wurden, erfolgt an dieser Stelle nur eine Kurzbeschreibung der relevanten Dimensionen.

Die Dimension *Attraktivität* lässt sich als die allgemeine Zufriedenheit bzw. Unzufriedenheit, bspw. im Sinne von gut/schlecht oder erfreulich/unerfreulich, beschreiben, ohne dass ein konkreter Bezug zu UX-Eigenschaften besteht. Somit spiegelt die Dimension mehr einen Gesamteindruck als einen UX-Aspekt wider, weshalb sie sich auch nicht in pragmatische oder hedonische Qualitätskriterien einteilen lässt. Unter die Dimension *Durchschaubarkeit* fallen die Teilaspekte intuitive Bedienbarkeit, schnelle und leichte Erlernbarkeit sowie Konsistenz (gleiche oder ähnliche Funktionen sind an gleichen Stellen in dem Produkt verortet, was zu einer vereinfachten Navigation führt). Die Dimension *Effizienz* deckt zwei wesentliche Aspekte ab, die die UX maßgeblich beeinflussen: die System-Antwortzeit (Antwortdauer des Systems auf Nutzereingaben) und das effiziente Design (Minimierung der notwendigen Benutzereingaben zur Bearbeitung einer Aufgabe). Als letztes pragmatisches Qualitätskriterium erfasst der UEQ die *Steuerbarkeit*. Diese Dimension lässt sich am ehesten mit dem Gefühl der Kontrolle über das System und der Vorhersehbarkeit (System reagiert wie erwartet auf Nutzungseingaben) beschreiben.

Als hedonisches Qualitätskriterium beschreibt die Dimension *Originalität* die Wahrnehmung des Produkts als neuartig, originell und kreativ. Bei der Dimension „Stimulation geht es [...] darum, dass die Gestaltung des Produkts interessant, geistig anregend und damit motivierend

ist“ (Schrepp, 2018b, S. 64). Ein maximal gesteigerter Zustand der Stimulation kann auch als *Immersion* bezeichnet werden (siehe hierzu auch: Kapitel 2.6). Der UEQ besteht aus 26 Testitems, die als semantisches Differential (vgl. Abb. 22) auf einer siebenstufigen Skala (-3 bis +3, 0 neutral) formuliert sind. Wie in

Tab. 18 verdeutlicht, wechselt die Anordnung positiv und negativ konnotierter Wortpaare entlang des Fragebogens, sodass das Ankreuzen des linken Extremwerts (und vice versa) nicht mit einer negativen oder positiven Wertung gleichzusetzen ist. Dies wird jedoch bei der Auswertung durch Invertieren der Werte berücksichtigt.

Tab. 17: Benchmark-Vergleichs-Grenzen des User-Experience-Questionnaire (nach Schrepp, 2019).

Interpretation	Benchmark-Vergleich
exzellent	Im Ergebnisbereich der besten 10 %
gut	10 % der Ergebnisse sind besser, 75 % sind schlechter
überdurchschnittlich	25 % der Ergebnisse sind besser, 50 % sind schlechter
unterdurchschnittlich	50 % der Ergebnisse sind besser, 25 % sind schlechter
schlecht	Im Ergebnisbereich der schlechtesten 25 %

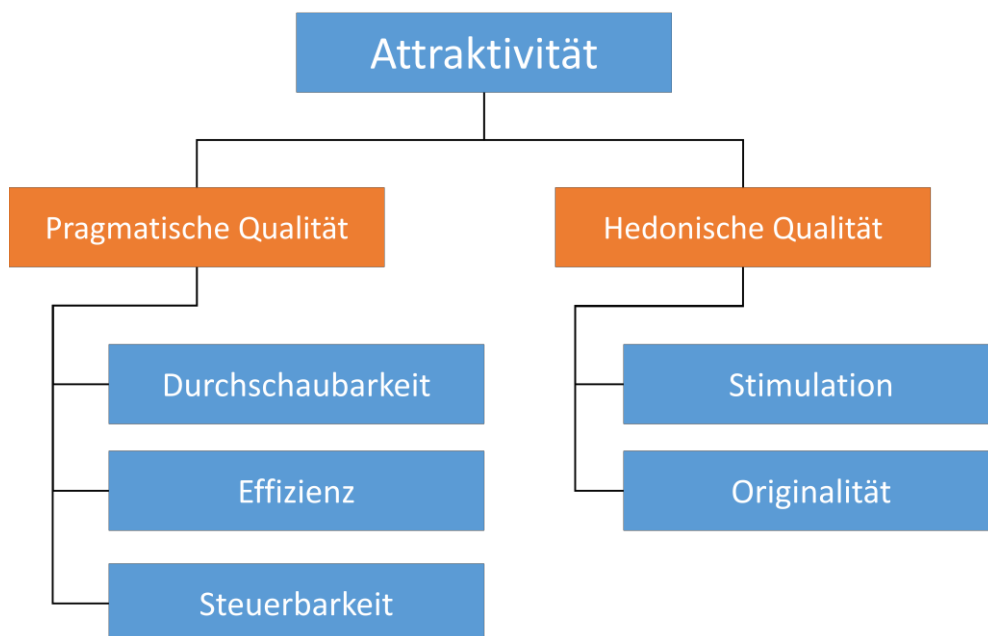


Abb. 21: Struktur des User-Experience-Questionnaire (nach Schrepp, 2019, S. 3).

gut ○○○○○○○ schlech

Abb. 22: Itembeispiel des User-Experience-Questionnaire.

Tab. 18: Frageitems des User-Experience-Questionnaire nach vorgegebener Reihenfolge und zugeordneter Dimension. Fett hervorgehoben sind i. S. der zu erfassenden Dimension positiv konnotierte Adjektive des semantischen Potenzials.

Itemcode	linke Beschriftung	rechte Beschriftung	Dimension
1	unerfreulich	erfreulich	Attraktivität
2	unverständlich	verständlich	Durchschaubarkeit
3	 kreativ	phantasielos	Originalität
4	 leicht zu lernen	schwer zu lernen	Durchschaubarkeit
5	 wertvoll	minderwertig	Stimulation
6	langweilig	 spannend	Stimulation
7	uninteressant	 interessant	Stimulation
8	unberechenbar	 voraussagbar	Steuerbarkeit
9	 schnell	langsam	Effizienz
10	 originell	konventionell	Originalität
11	behindernd	 unterstützend	Steuerbarkeit
12	 gut	schlecht	Attraktivität
13	kompliziert	 einfach	Durchschaubarkeit
14	abstoßend	 anziehend	Attraktivität
15	herkömmlich	 neuartig	Originalität
16	unangenehm	 angenehm	Attraktivität
17	 sicher	unsicher	Steuerbarkeit
18	 aktivierend	einschläfernd	Stimulation
19	 erwartungskonform	nicht erwartungskonform	Steuerbarkeit
20	ineffizient	 effizient	Effizienz
21	 übersichtlich	verwirrend	Durchschaubarkeit
22	unpragmatisch	 pragmatisch	Effizienz
23	 aufgeräumt	überladen	Effizienz
24	 attraktiv	unattraktiv	Attraktivität
25	 sympathisch	unsympathisch	Attraktivität
26	konservativ	 innovativ	Originalität

Konfirmatorische Faktorenanalyse der User-Experience-Questionnaire-Dimensionen

Im Rahmen der Untersuchung des Einflusses des Mediums auf die UX (FF2) wurde mithilfe der erhobenen Daten der Studien zum Alzheimerkoffer eine konfirmatorische Faktorenanalyse durchgeführt, um zu überprüfen, ob das von Laugwitz et al. (2008) entwickelte Messmodell zu den realen Daten passt. Aufgrund normalverteilter Daten konnte hierzu der Maximum-Likelihood-Schätzer verwendet werden. Das Messmodell zeigte im ersten Durchlauf einen moderaten Model-Fit ($n = 240, X^2(284) = 557.09, p = .00, CFI = .916, TLI = .904,$

RMSEA = .056, SRMR = .062). Ausgehend von den niedrigen R²-Werten sowie den Faktorladungen wurden die Items UEQ8, UEQ5, UEQ18 und UEQ14 in einem zweiten Durchlauf ausgeschlossen, sodass sich der Model-Fit (n = 240, X²(194) = 330.53, p = .00, CFI = .933, TLI = .920, RMSEA = .054, SRMR = .053) leicht verbesserte. Das Ergebnis der konfirmatorischen Faktorenanalyse ist in Abb. 23 dargestellt.



Abb. 23: User-Experience-Questionnaire: Pfaddiagramm der konfirmatorischen Faktorenanalyse ausgewählter Items. Residualwerte, standardisierte Faktorladungen sowie Interkorrelationen der Faktoren.

Reliabilitätsanalyse der User-Experience-Questionnaire-Dimensionen

Die Items der einzelnen UEQ-Dimensionen wurden für unterschiedliche Untersuchungsszenarien einer Reliabilitätsanalyse unterzogen. Da der Einfluss der Steuerungsart (FF3) und der medialen Repräsentation (FF4) auf die UX stark an das konkrete Studiendesign geknüpft ist und kein Vergleich mit ähnlichen (externen) Studien vollzogen wurde, wurden im Rahmen der Reliabilitätsanalyse diejenigen Items entfernt, die zu einer Verringerung von Cronbachs Alpha von $\alpha_A > .30$ führten. Zur Einordnung der eingesetzten App

im Zuge des Benchmark-Vergleichs wurden hingegen keine Items entfernt, um eine bessere Vergleichbarkeit und Validität erhalten zu können. Eine tabellarische Darstellung der Reliabilitätsanalysen findet sich im Anhang (Anhang 3.1.4 und 3.1.5 , S. A160 f.).

5.9.4 Empfundene Lernunterstützung

Im Rahmen der Abschlussbefragung wurden u. a. Fragen zur ELU gestellt, die neben dem CL (vgl. Kapitel 5.9.2) und der UX (vgl. Kapitel 5.9.3) Aufschluss über das Lernen mit AR und EUM geben. Die zwölf Frageitems (vgl. Tab. 19) wurden eigens für die Studie erstellt. Sie sind dichotom formuliert, sodass entweder das Lernen mit AR oder das Lernen mit EUM auf einer zehnstufigen, endpunktbenannten Likert-Skala bewertet werden sollte. Die Fragen wurden den Teilnehmenden in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Anschließend wurden für die Hauptkomponentenanalyse die Daten der Studien zum Alzheimerkoffer herangezogen, da diese konkret den medialen Vergleich von AR und EUM beinhalten und die nötige Stichprobengröße aufweisen.

Das KMO-Kriterium und der Bartlett-Test zeigten sehr gute Werte (KMO: .890; $X^2(66) = 2037$, $p < .001$), $n = 338$), sodass die Bedingungen für die Hauptkomponentenanalyse erfüllt waren. Nach dem KMO-Kriterium und der Überprüfung des Scree-Plots zeichnete sich eine Zwei-Komponenten-Lösung ab, mit der 63,1 % der Varianz erklärt werden können. Die Faktorenextraktion mit schiefwinkliger Rotationsmethode (Oblimin) zeigte sehr hohe Faktorladungen (Tab. 20) für die Frageitems zum Lernen mit AR (Komponente 1) und hohe Faktorladungen zum Lernen mit EUM (Komponente 2). Beide Komponenten korrelieren schwach negativ miteinander ($r = -.178$, Tab. 21).

Tab. 19: Empfundene Lernunterstützung: Frageitems zur Erfassung der empfundenen Lernunterstützung von Augmented Reality (ar1–ar6) und etablierter Unterrichtsmedien (eum1–eum6). * nicht Teil des finalen Modells.

Itemcode	Formulierung
ar1	Ich lerne lieber mit Augmented Reality.
ar2	Mit Augmented Reality lerne ich besser.
ar3	Ich war mit Augmented Reality konzentriert bei der Arbeit.
ar4	Augmented Reality ermuntert mich zum Lernen.
ar5	Mit der Augmented Reality konnte ich die Inhalte schneller lernen.
ar6	Augmented Reality fördert meine Medienkompetenz.
eum1	Ich lerne lieber mit analogen/klassischen Medien (Internet, Arbeitsblatt, Modell etc.).
eum2	Mit analogen/klassischen Medien lerne ich besser.
eum3	Ich war mit analogen/klassischen Medien konzentriert bei der Arbeit.
eum4	Analoge/klassische Medien ermuntern mich zum Lernen.
eum5	Mit analogen/klassischen Medien konnte ich die Inhalte schneller lernen.
eum6*	Analoge/klassische Medien fördern meine Medienkompetenz.

Tab. 20: Empfundene Lernunterstützung: Faktorladungen und interne Konsistenz (Cronbach's Alpha) per Faktor.

Faktor/Item	Ladung	Alpha
K1: ELU AR		.910
ar1	.829	
ar2	.926	
ar3	.755	
ar4	.845	
ar5	.847	
ar6	.775	
K2: ELU EUM		.782
eum1	.777	
eum2	.717	
eum3	.642	
eum4	.774	
eum5	.705	
eum6	.537	

Tab. 21: Empfundene Lernunterstützung: Korrelationen zwischen den Faktoren.

Faktorpaarungen	Korrelation
ELU AR – ELU EUM	-.178

Die interne Konsistenz (hier: Cronbach's Alpha) liegt für beide Komponenten auf einem hohen bis sehr hohen Niveau (ELU AR: $\alpha = .910$, ELU EUM: $\alpha = .782$). Lediglich das Item eum6 weist eine vergleichsweise niedrige Faktorladung (.537, Tab. 20) und eine sehr geringe quadrierte multiple Korrelation ($R^2 = .032$, Tab. 22) auf, sodass es von der konfirmatorischen Faktorenanalyse ausgeschlossen wurde. Es konnte ein sehr guter Model-Fit ($n = 346$, $\chi^2(43) = 73,19$, $p = .003$, CFI = .990, TLI = .988, RMSEA = .045, SRMR = .065) identifiziert werden. Das primäre und finale Modell inklusive der Residualwerte, der Faktorladungen sowie der Interkorrelationen der Faktoren ist in Abb. 24 dargestellt.

Tab. 22: Empfundene Lernunterstützung: Mittelwerte, Standardabweichung, Schiefe, Kurtosis und quadrierte multiple Korrelation R^2 der einzelnen Items der empfundenen Lernunterstützung in der Studie zum Alzheimerkoffer (n = 338).

Faktor/Item	Mittelwert	SD	Schiefe	Kurtosis	R^2
Items AR					
Item ar1	5.43	3.232	-.107	-1.082	.748
Item ar2	5.00	2.962	-.022	-.881	.876
Item ar3	5.44	2.806	-.195	-.713	.475
Item ar4	5.91	3.033	-.387	-.818	.708
Item ar5	5.52	2.815	-.151	-.743	.727
Item ar6	5.67	3.004	-.277	-.861	.482
Items EUM					
Item eum1	6.04	2.786	-.382	-.663	.799
Item eum2	5.73	2.854	-.209	-.728	.752
Item eum3	6.48	2.654	-.552	-.365	.229
Item eum4	4.33	2.809	.250	-.720	.234
Item eum5	5.49	2.644	-.225	-.557	.432
Item eum6	3.58	2.776	.375	-.653	.032

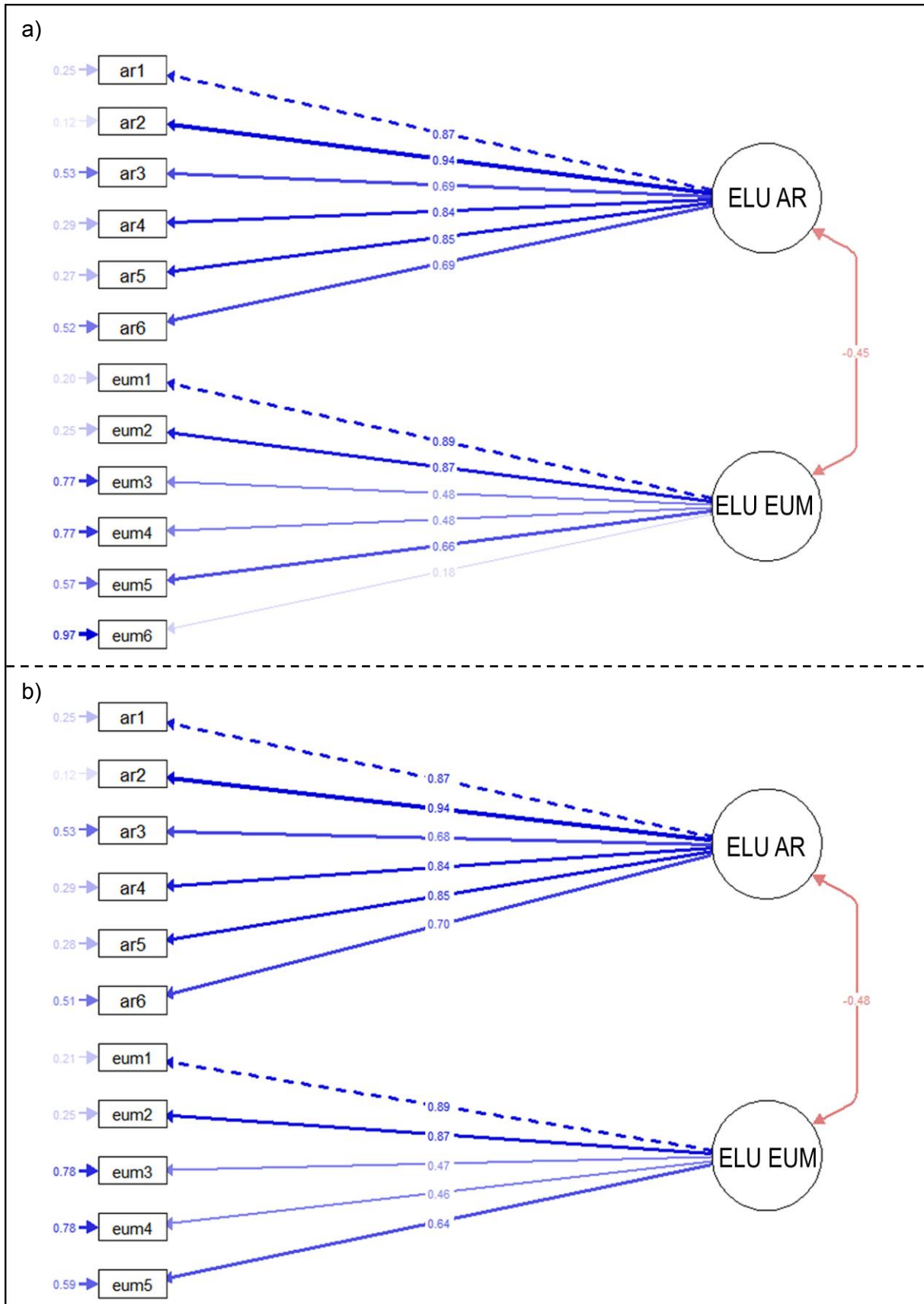


Abb. 24: Empfundene Lernunterstützung: Pfaddiagramm der konfirmatorischen Faktorenanalyse aller Items (a) sowie ausgewählter Items (b). Residualwerte, standardisierte Faktorladungen sowie Interkorrelationen der Faktoren.

5.9.5 Augmented-Reality-Immersion-Fragebogen

Dem von Georgiou und Kyza (2017b) entwickelten Fragebogen zur Bewertung der Immersion bei ortsbezogenen AR-Anwendungen liegen die drei von Brown und Cairns (2004) im Kontext von Computerspielen entwickelten Ebenen der Immersion *Engagement*, *Inanspruchnahme* und *totale Immersion* zugrunde. Engagement basiert auf Zugang und Investition der Nutzenden. Wenn Nutzende auf das Spiel zugreifen können, investieren sie Zeit sowie Anstrengung und widmen sich dem Spiel. Auf der zweiten Ebene, *Inanspruchnahme*, lassen sich die Nutzenden weiter auf das Spiel ein, sodass Aufmerksamkeit und emotionale Verbundenheit zu den bestimmenden Faktoren werden. Auf der dritten Ebene, *der totalen Immersion*, erreichen die Spieler ein Gefühl der Präsenz in der Spielwelt, was mit einem Flow-Erlebnis und dem Gefühl einhergeht, dass das Spiel alles ist, was zählt (Brown & Cairns, 2004, S. 1299). Der von M. T. Cheng et al. (2015) entwickelte Gamer-Immersion-Questionnaire (GIQ) gilt als gut strukturiertes und reliables Messinstrument zur Erfassung der Immersion (Georgiou & Kyza, 2017b, S. 27) in desktopbasierten (Spiel-)Umgebungen. Er greift ebenfalls die von Brown und Cairns (2004) beschriebenen Ebenen der Immersion auf und beschreibt fünf mehrdimensionale Faktoren, die den drei Immersionsebenen zugrunde liegen. Georgiou und Kyza (2017b) griffen in der Entwicklung des Augmented-Reality-Immersion(ARI)-Fragebogens den GIQ auf und nahmen inhaltliche Ergänzungen vor, um die Immersion in AR-Lernumgebungen erfassen zu können. Darüber hinaus wurde die mehrdimensionale Faktorenbeschreibung von M. T. Cheng et al. (2015) integriert und für AR-Lernumgebungen adaptiert. Der ARI-Fragebogen wurde in mehreren Phasen mittels explorativer Faktorenanalyse, Hauptkomponentenanalyse sowie konfirmatorischer Faktorenanalyse untersucht und durch Itemselektion optimiert, sodass eine zufriedenstellende Modellpassung mit guter Validität und Reliabilität erreicht wurde. Die anschließende Strukturgleichungsmodellierung unterstützt weiterhin die interne Struktur des hierarchischen, mehrstufigen Testinstruments, wonach den Immersionsebenen unterschiedliche Faktoren zugrunde liegen (Georgiou & Kyza, 2017b, S. 32). Demnach bilden *Interesse* und *Nutzungsfreundlichkeit* die Ebene des *Engagement* ab, *Emotionale Beteiligung* und *Fokussierung* bilden die Ebene der *Inanspruchnahme* ab und *Präsenz* sowie *Flow* bilden *totale Immersion* ab. Die 21 Testitems des ARI-Fragebogens wurden vom Englischen ins Deutsche übersetzt, an den Inhalt der Studie angepasst und – um Übersetzungsfehler zu verhindern – zurück ins Englische übersetzt. Bei den Anpassungen wurden Formulierungen gewählt, die sowohl die Intervention mit AR und digitalen Hirnmodellen als auch die Intervention mit dem realen Papierhirnmodell berücksichtigen. Die Testitems wurden den Teilnehmenden auf einer fünfstufigen verbalisierten Likert-Skala (*trifft überhaupt nicht zu*, *trifft nicht zu*, *teils*, *teils*, *trifft zu*, *trifft völlig zu*) dargeboten. Die Übersetzung der Testitems inklusive der Zuordnung zu den Immersionsebenen und Faktoren ist in

Tab. 23 dargestellt. Aufgrund der Stichprobengröße von n = 61 (gültige Fälle) konnten die von Little (2013, S. 742) bzw. von Kass und Tinsley (1979, S. 124) empfohlenen Mindestanforderungen von 4 Fällen bzw. 5 bis 10 Fällen pro Variable für eine Hauptkomponentenanalyse nicht erfüllt werden, sodass das Testinstrument einer Reliabilitätsanalyse unterzogen wurde.

Tab. 23: Deutsche Übersetzung des Augmented-Reality-Immersion-Fragebogens sowie die Zuordnung der Testitems zu den Immersionsebenen (fett gedruckt) und Faktoren. * invertierte Testitems.

Itemcode	Ebenen und Faktoren	Originalitem	Deutsche Übersetzung
	Engagement		
a1	Interesse	I liked the activity because it was novel	Ich mochte die Arbeit mit dem Gehirnmodell, da dies etwas Neues ist.
a2		I liked the type of the activity	Ich mag diese Art von Aktivitäten.
a3		I wanted to spend the time to complete the activity successfully	Ich verbrachte die Zeit gerne damit, mit den Gehirnmodellen zu arbeiten.
a4		I wanted to spend time to participate in the activity	Ich verbringe gerne die Zeit mit solchen Aktivitäten.
a5	Nutzerfreundlichkeit	It was easy for me to use the AR application	Die Arbeit mit dem Modell war einfach für mich.
a6		I found the AR application confusing*	Ich fand die Arbeit mit dem Modell verwirrend.
a7		The AR application was unnecessarily complex*	Die Arbeit mit dem Modell war unnötig komplex.
a8		I did not have difficulties in controlling the AR application	Ich hatte keine Schwierigkeiten bei der Arbeit mit dem Modell.
	Inanspruchnahme		
b1	Emotionale Beteiligung	I was curious about how the activity would progress	Ich war gespannt, wie die Arbeit mit dem Modell wohl weitergehen wird.
b2		I was often excited since I felt as being part of the activity	Ich war ziemlich aufgeregt während der Nutzung des Modells, da ich das Gefühl hatte, in die Aktivität einzutauchen.
b3		I often felt suspense by the activity	Die Arbeit mit dem Modell war spannend.
b4	Fokussierung	If interrupted, I looked forward to returning to the activity	Wenn ich bei der Arbeit mit dem Modell unterbrochen wurde, habe ich mich darauf gefreut, nach der Unterbrechung wieder mit der Arbeit fortzufahren.
b5		Everyday thoughts and concerns faded out during the activity*	Während der Arbeit mit dem Modell sind meine Gedanken nicht abgeschweift.
b6		I was more focused on the activity rather on any external distraction	Ich war stärker auf die Arbeit mit dem Modell fokussiert als auf alles andere um mich herum.
	Totale Immersion		
c1	Präsenz	The activity felt so authentic that it made me think that the virtual characters/objects existed for real.	Die Arbeit mit dem Modell fühlte sich so an, als ob das Objekt in der Realität existieren würde.
c2		I felt that what I was experiencing was something real, instead of a fictional activity	Ich hatte das Gefühl, etwas Reales zu erleben, anstatt mit einem Modell zu arbeiten.
c3		I was so involved in the activity, that in some cases I wanted to interact with the virtual characters/objects directly	Ich hatte bei der Arbeit mit dem Modell einen derart realen Eindruck, dass ich unmittelbar mit dem echten Gehirn interagieren wollte.

c4 <i>Fortsetzung Tab. 23</i>	I so was involved, that I felt that my actions could affect the activity	Ich hatte das Gefühl, ich würde mit einem echten Gehirn arbeiten.
c5 Flow	I didn't have any irrelevant thoughts or external distractions during the activity	Während der Arbeit mit dem Modell wurde ich von keinen Gedanken oder äußeren Einflüssen abgelenkt.
c6	The activity became the unique and only thought occupying my mind	Die Arbeit mit dem Modell hat meine gesamte Aufmerksamkeit gebunden.
c7	I lost track of time, as if everything just stopped, and the only thing that I could think about was the activity	Ich habe bei der Arbeit mit dem Modell ganz die Zeit vergessen und alles um mich herum war unwichtig.

Reliabilitätsanalyse des Augmented-Reality-Immersion-Fragebogen

Die Items des ARI-Fragebogens wurden für unterschiedliche Untersuchungsszenarien einer Reliabilitätsanalyse unterzogen. Da der Einfluss der Triggerart (FF4) und der medialen Repräsentation (FF5) auf die Immersion stark an das konkrete Studiendesign geknüpft ist und kein Vergleich mit ähnlichen (externen) Studien vollzogen wurde, wurden im Rahmen der Reliabilitätsanalyse diejenigen Items entfernt, die zu einer Verringerung von Cronbachs Alpha von $\alpha_{\Delta} > .30$ führten. Eine tabellarische Darstellung der Reliabilitätsanalysen findet sich im Anhang (Anhang 3.1.11, S. A183 f.).

5.9.6 Kognitive Leistungstests

Zur Erfassung des Vorwissens, des Lernerfolgs und des LZ (vgl. Kapitel 2.8, 5.7) wurden kognitive Leistungstests eingesetzt, die auf den den Studien zugrunde liegenden unterrichtlichen Inhalten beruhen. Mithilfe der kognitiven Leistungstests wurden das Vorwissen (Pre-Test) und der Lernerfolg (Post-Test) nach den studienspezifischen Interventionen erfasst. Als zentrale Untersuchungsgröße für derartige Pre-Post-Test-Designs wird der relative LZ nach Hake (1998) berechnet, da bei diesem die unterschiedlichen Wissensstände der Teilnehmenden zu Beginn berücksichtigt werden und er so einen fairen Vergleich auf der Ebene der Probanden und auf der Ebene der LS ermöglicht. Er berechnet sich aus dem Quotienten des tatsächlich erreichten LZ (Post-Test [%] – Pre-Test [%]) und dem maximal möglichem LZ (100 % – Pre-Test [%]).

$$LZ = \frac{Post - Pre}{100\% - Pre}$$

Dabei bezeichnen *Post* und *Pre* jeweils den Anteil der erreichten Punkte in Prozent. Da sich die eingesetzten kognitiven Leistungstests im Aufbau und im Inhalt voneinander unterscheiden, erfolgt die Detailbeschreibung im Einzelnen.

Alzheimerkoffer

Pre- und Post-Test: Anhang 2.2.1, S. A136 f.

Musterlösung und Auswertungsmatrix: Anhang 2.2.2, S. A141 f.

Bei den kognitiven Leistungstests der Stunden zum Alzheimerkoffer handelt es sich um identische Paper-Pencil-Tests, die von den Schüler:innen zu Beginn der Unterrichtsstunde (Pre-Test) und nach den Unterrichtsstunden (Post-Test) ausgefüllt wurden. Die Inhalte der Testaufgaben berücksichtigen nur die studienrelevanten Aufgaben (LS). Eine genaue Zuordnung der Testaufgaben und der LS findet sich in Tab. 9 (vgl. Kapitel 5.8, S. 107 f.). Obwohl das Paper-Pencil-Verfahren einen hohen Auswertungsaufwand und hohe Druckkosten bedeutet, bietet es im Kontext des Studiendesigns und der verwendeten Aufgabentypen einige Vorteile.

Der Paper-Pencil-Test ist in allen Altersstufen gleichermaßen einsetzbar und zeiteffektiver, da keine Vorerfahrungen mit digitalen Formaten und Plattformen notwendig sind, die im Regelfall einer medialen Einführung bedürfen. Weiterhin legen die Stunden zum Alzheimerkoffer einen Schwerpunkt auf die Anatomie des Gehirns und deren Veränderungen in Zuge der Alzheimer-Demenz, was eine räumliche Verortung durch Einzeichnen bestimmter Areale und Hirnregionen essenziell macht. Eine rein textliche Beschreibung der Lagerrelation wäre an dieser Stelle weniger zielführend als eine visuelle Verortung der Hirnregionen in Abbildungen. Darüber hinaus handelt es sich um halboffene Aufgaben, sodass Kurzbeschreibungen und Begriffe als Antworten erwartet werden. Eine Eingabe über die Bildschirmtastatur der Tablets würde hier deutlich mehr Zeit benötigen als die schriftliche Beantwortung auf Papier.

Die Auswertung der Aufgaben erfolgte anhand formaler Kriterien gemäß der Auswertungsmatrix, die vorsehen, für jeden korrekten Begriff bzw. jedes korrekte Einzeichnen einen Punkt zu vergeben. Bei Aufgaben, in denen in Abbildungen gezeichnet werden sollte, wurden ausgehend von der Musterlösung Toleranzen festgelegt, innerhalb derer eine Punktevergabe zulässig ist. Die maximal erreichbare Punktzahl über alle Aufgaben hinweg beträgt 55 Punkte, die sich wie in Tab. 24 dargestellt auf die einzelnen Aufgaben verteilen. Der Großteil der Testaufgaben entspricht dem Aufgabenformat und der visuellen Darstellung der LS. In Aufgabe 6 (Funktionen einzelner Gehirnregionen) findet hingegen ein Wechsel der visuellen Darstellung von einer Tabelle hin zu einer Abbildung statt.

Tab. 24: Alzheimerkoffer: Punkteverteilung je Aufgabe und Summe.

Aufgabe	Max. Punktzahl
1	12
2	2
3	2
4	6
5	10
6	8
7	2
8	6
9	7
Summe	55

Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten

Pre- und Post-Test: Anhang 2.3.1, S. A147 f.

Musterlösung und Auswertungsmatrix: Anhang 2.3.1, S. A147 f.

Bei den kognitiven Leistungstests der Stunden zum Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten handelt es sich um identische Multiple-Choice-Tests, die von den Schüler:innen zu Beginn der Unterrichtsstunde (Pre-Test) und nach der Unterrichtsstunde (Post-Test) ausgefüllt wurden. Die Vorteile von Multiple-Choice-Tests liegen besonders in der effizienten Auswertungsmöglichkeit bei digitaler Erfassung der Daten. Die Testumgebung ist, wie auch die Fragebögen, in LimeSurvey integriert, sodass kein Plattformwechsel notwendig ist. Die digitale Datenerhebung ermöglicht darüber hinaus eine zeiteffektive Datenerfassung, da sich die Stichproben-Zielgruppe in der zugrunde liegenden Studie auf die Sekundarstufe II fokussiert und der Umgang mit digitalen Plattformen vorausgesetzt werden kann. Ferner stellt dieses Verfahren eine nachhaltige Lösung dar, da Druckkosten minimiert und Ressourcen geschont werden.

Die Tests umfassten je elf Multiple-Choice-Fragen mit möglicher Mehrfachauswahl sowie eine Aufgabe mit kurzer Texteingabe (A2). Da zur Auswertung der Daten zwischen Wissen in Bezug auf Mitochondrien und Wissen in Bezug auf Chloroplasten unterschieden werden musste, lassen die Fragestellungen, mit Ausnahme von A2 und A4, eine direkte Zuordnung zu den jeweiligen Wissensdomänen zu. Darüber hinaus sind die Fragen für Mitochondrien und für Chloroplasten korrespondierend formuliert, sodass sich diese auf inhaltlicher Ebene und hinsichtlich der Schwierigkeit durch die starke Ähnlichkeit der Fragestellungen und Antwortmöglichkeiten vergleichen lassen. Im Fall von A2 bezieht sich die Fragestellung sowohl auf Mitochondrien als auch auf Chloroplasten und bei A4 beziehen sich die korrekten Antworten entweder auf Mitochondrien oder auf Chloroplasten, sodass anhand der angekreuzten Antworten innerhalb von A4 eine Differenzierung möglich war. Jede korrekte Antwort wurde mit einem Punkt bewertet, sofern innerhalb der Frage kein Distraktor

angekreuzt wurde. Somit entspricht die maximale Punktzahl einer Aufgabe der Anzahl korrekter Antworten. Minuspunkte wurden nicht vergeben. Eine Darstellung der Anzahl korrekter Antworten, der Distraktoren sowie der Punktezuordnung zu den beiden Inhalten für die einzelnen Aufgaben findet sich in Tab. 25.

Tab. 25: Anzahl korrekter Antworten, Distraktoren sowie Punktezuordnung zu den Wissensdomänen *Mitochondrium* und *Chloroplast*.

Frage	Mögliche Anzahl korrekter Antworten	Distraktoren	Mitochondrium	Chloroplast
A1	1	3		1
A2	1	(Texteingabe)	1	1
A3	1	3	1	
A4	2	2	1	1
A5	1	3	1	
A6	1	2		1
A7	1	4	1	
A8	1	4		1
A9	1	2	1	
A10	1	4		1
A11	1	3	1	
A12	1	3		1

HoloBrain

Pre- und Post-Test: Anhang 2.4.1, S. A150

Musterlösung und Auswertungsmatrix: Anhang 2.4.1, S. A151

Bei den kognitiven Leistungstests der Studie zur HoloBrain-App handelt es sich um identische Tests, die von den Teilnehmenden zu Studienbeginn (Pre-Test) und nach der ersten Intervention (Post-Test) ausgefüllt wurden. Wie bereits in Kapitel 5.4 beschrieben, wurde das finale Testinstrument aufgrund von Integrationshindernissen von Moodle in OLAT methodisch neu gestaltet (vgl. Abb. 25). Die inhaltliche Umsetzung ist auf beiden Plattformen identisch, jedoch bestehen wesentliche Unterschiede in der Bedienbarkeit durch den Wegfall der Drag-and-Drop-Funktion von Textboxen auf die Abbildungen in OLAT sowie durch die notwendige Änderung des Zeitlimits für die Bearbeitung der Aufgaben von 90 Sekunden auf 2 Minuten. Die finale Umsetzung in OLAT gestaltet sich daher wie folgt:

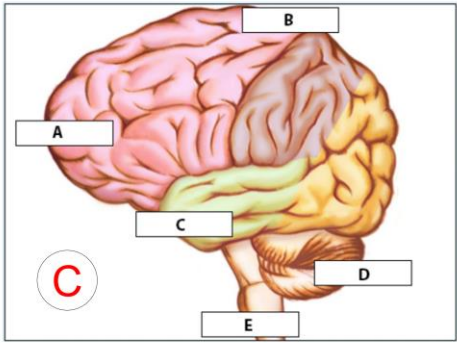
Der Test besteht aus zwei Zuordnungsaufgaben, bei denen bestimmten Gehirnregionen und anatomische Lagebeschreibungen in Textboxen den korrekten Positionen auf Abbildungen des menschlichen Gehirns zugeordnet werden sollen. Die Zeit wurde als weiterer Trennfaktor eingeführt und auf 2 Minuten festgelegt. Pro Aufgabe mussten jeweils fünf Begriffe den korrekten Positionen in der Abbildung zugeordnet werden, sodass im Test maximal zehn Punkte erreicht werden konnten. Die Abbildungen enthalten an bestimmten Positionen Buchstabenreferenzen. Diese Referenzen finden sich neben der Abbildung in Textboxen, sodass die Begriffe (ebenfalls in Textboxen) nicht direkt der Abbildung zugeordnet werden, sondern den Textboxen mit Buchstabenreferenzen. Um auszuschließen, dass eine mögliche Überschreitung des Zeitlimits auf die Bedienbarkeit zurückzuführen ist, wurde dem Pre-Test eine vom Inhalt abgekoppelte, aber in der Bedienung identische Übungsaufgabe vorangestellt.

Test time limit: 00:02:00 (ending at 10:02): 00:01:40 Weniger als 5 Minuten bis zum Ende des Tests **A**

Gruppe
 Bitte geben Sie Ihre Kennung ein
Hirnanatomie 1
 Hirnanatomie 2

Hirnanatomie 1 Nicht beantwortet

Beschreiben Sie die Abbildung durch Zuordnen der korrekten Begriffe!



B

C

D

Parietallappen
 Stammhirn
 Temporallappen
 Cerebellum

E

A
 Frontallappen
 D
 B
 C
 E

F

Antwort speichern Nächste Frage >

Abb. 25: Beispielaufgabe des Pre-/Post-Tests der HoloBrain-Studie in OLAT. A: verbleibende Zeit, **B:** Aufgabenübersicht, **C:** zu beschriftende Abbildung, **D:** Textboxen mit Begriffen (verschiebbar via Drag and Drop), **E:** Textboxen mit Buchstabenreferenzen zur Abbildung (nicht verschiebbar), **F:** Navigation zur nächsten Aufgabe.

6 Ergebnisse

Auf Grundlage der in Kapitel 4 beschriebenen forschungsleitenden Fragestellungen und Hypothesen sowie der in Kapitel 5.9 definierten Testinstrumente wurden mithilfe statistischer Verfahren die erhobenen Daten ausgewertet. Dementsprechend werden im Folgenden die Ergebnisse zum Vorwissen, zum Lernerfolg, zum LZ, zum CL, zur UX, zur ELU und zur Immersion dargelegt.

6.1 Vorwissen, Lernerfolg und Lernzuwachs

Bei dem Vorwissen, dem Lernerfolg und dem LZ handelt es sich um objektiv erfassbare Messgrößen, die wie in Kapitel 5.9.6 beschrieben im Pre-Post-Test-Design erhoben wurden. Die Pre-Test-Ergebnisse ermöglichen einerseits Rückschlüsse auf das Vorwissen der Lernenden und andererseits stellen sie die Grundlage zur Erfassung der Gruppengleichheit als zentrale Testvoraussetzung dar. Der LZ ergibt sich aus der Differenz der Post-Test-Ergebnisse und des Vorwissens der Lernenden (vgl. Kapitel 5.9.6). Er ist essenziell zur Beurteilung der Lernwirksamkeit und zur Beantwortung der Forschungsfragen und Hypothesen (vgl. Kapitel 4).

In den Kapiteln 6.1.1 bis 6.1.3 werden zunächst die untersuchten Gruppen hinsichtlich ihres Vorwissens miteinander verglichen, um darauf aufbauend Mittelwertvergleiche bezüglich des LZ durchführen zu können. Ferner wird in den Kapiteln 6.2 bis 6.5 der LZ im Rahmen von Zusammenhangsanalysen zu subjektiven Messgrößen wie dem CL oder der UX in Bezug gesetzt.

6.1.1 Art des Mediums (Forschungsfrage 2): Aufbau des Gehirns und Alzheimer-Demenz

Um die Lernwirksamkeit einzelner medialer Darstellungsformen beurteilen (FF2) zu können, gilt der LZ als die zentral zu betrachtende Größe. Da sich dieser aus der Differenz der Post-Test-Ergebnisse und des Vorwissens der Lernenden ergibt, muss die Voraussetzung der Gruppengleichheit in Bezug auf das Vorwissen erfüllt sein, um Mittelwertvergleiche des LZ durchführen zu können. Aufgrund des Kreuzdesigns der Studie (vgl. Kapitel 5.7) und der angestrebten Analysen wurde bzgl. des Vorwissens eine Vergleichbarkeitsprüfung nach Stammgruppen (A und B) sowie nach Medieneinsatz gebildete Gruppen (AR und EUM) durchgeführt.

Die Voraussetzungen und Annahmen zur Durchführung der parametrischen Mittelwertvergleiche wurden wie in Kapitel 5.9.1 beschrieben durchgeführt. Weder der t-Test unabhängiger Stichproben mit Einteilung nach den Stammgruppen (A und B) ($t(370) = .19$, $p = .849$) noch der t-Test verbundener Stichproben mit Einteilung nach Medium (AR und EUM)

($t(355) = -1.29, p = .195$) zeigten signifikanten Unterschiede (vgl. Tab. 26) hinsichtlich des Vorwissens, sodass von Gruppengleichheit ausgegangen werden konnte. Dies gilt nicht nur für die Zusammenfassung beider Unterrichtseinheiten, sondern auch auf den Ebenen einzelner Unterrichtseinheiten sowie auf der Ebene einzelner LS (vgl. Anhang 3.2.1, S. A184 f.). Vor der Anwendung wurde geprüft, ob die Annahmen zur Durchführung der Mittelwertvergleiche erfüllt sind (Skalenniveau, Normalverteilung, keine extremen Ausreißer, Homoskedastizität). Aufgrund der Gruppengleichheit konnte mit den weiteren Analysen fortgefahren und der LZ konnte valide bestimmt und untersucht werden.

Tab. 26: Mittelwertvergleiche des Vorwissens (Aufbau des Gehirns und Alzheimer-Demenz) über beide Unterrichtseinheiten des Alzheimerkoffers mittels t-Test unabhängiger Stichproben* (A und B) sowie t-Test verbundener Stichproben (AR und EUM). Stichprobengröße n, Mittelwert M, Standardabweichung SD, Standardfehler r sowie Signifikanz p.**

	Gruppe	n	M	SD	r	p
Vorwissen*	A	180	9.50	7.95	.59	.849
	B	192	9.34	8.15	.59	
Vorwissen**	AR	356	9.65	11.42	.61	.195
	EUM	356	10.28	12.48	.66	

Wie bereits eingangs erwähnt, kommt dem LZ eine herausragende Rolle zur Bewertung der Lernwirksamkeit zu, da hierbei, anders als beim Lernerfolg (Abschneiden im Post-Test), das Vorwissen berücksichtigt wird. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird der Fokus daher im Folgenden auf dem LZ liegen. Detaillierte Ergebnisse zum Lernerfolg sind im Anhang (vgl. Anhang 3.2.1, S. A184 f.) zu finden. Im Fokus der Betrachtung steht im Folgenden ein Teil der Forschungsfrage FF2 mit der Hypothese, dass die Nutzung von AR zur Aufgabenbearbeitung im Vergleich zu EUM zu einem höheren LZ führt (FF2 H1).

Der Vergleich des LZ erfolgte analog zum Vergleich des Vorwissens auf unterschiedlichen Ebenen (beide Unterrichtseinheiten, einzelne Unterrichtseinheiten sowie einzelne LS) und mit denselben Analysemethoden (t-Tests unabhängiger und verbundener Stichproben). Zuvor wurden ebenfalls die Voraussetzungen und Annahmen zur Durchführung der parametrischen Mittelwertvergleiche, wie in Kapitel 5.9.6 beschrieben, ermittelt und berücksichtigt.

Es konnten signifikante Unterschiede des LZ über beide Unterrichtseinheiten ($t(352) = 3.55, p < .001, d = .38$), für die Unterrichtseinheit *Der Aufbau des menschlichen Gehirns* ($t(342) = 2.28, p = .002, d = .25$) und für LS1 ($t(341) = 3.25, p = .001, d = .35$), für LS5 ($t(341) = 6.32, p < .001, d = .68$) sowie für LS8 ($t(251) = -2.56, p = .011, d = .32$) festgestellt werden (vgl. Abb. 26). Damit fallen mit Ausnahme von LS8 die beobachteten Unterschiede des LZ für die in Kapitel 5.5 beschriebene Stichprobe zugunsten von AR aus (FF2 H1), sodass im Vergleich zu EUM mit AR mehr gelernt wurde.

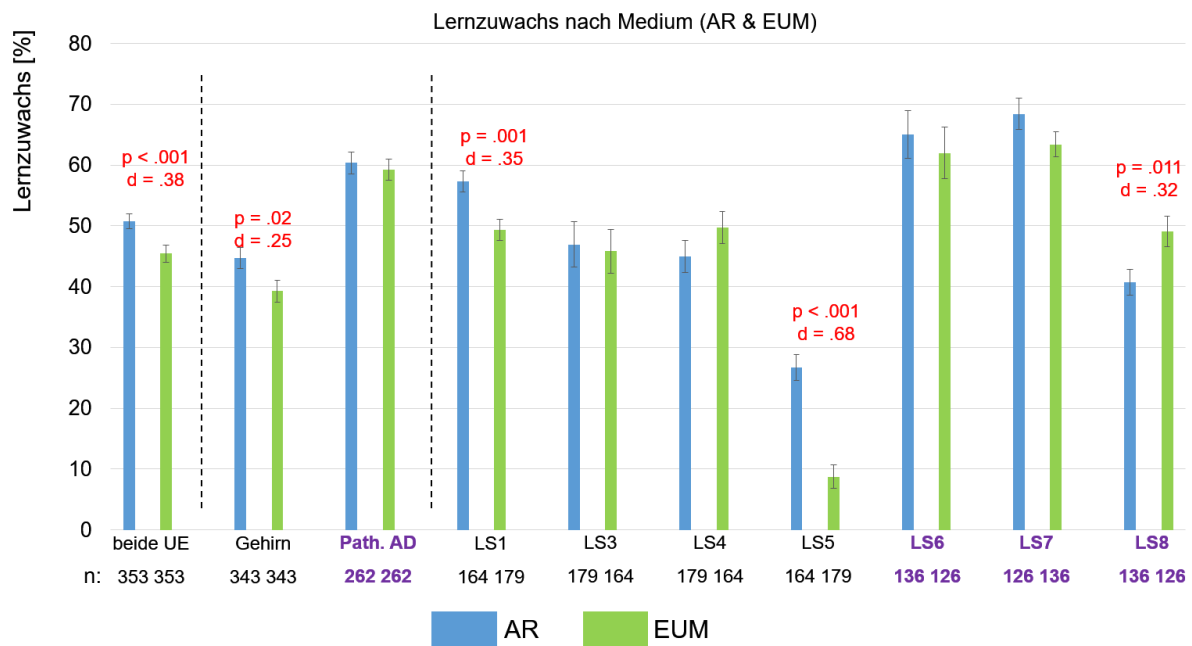


Abb. 26: Relativer Lernzuwachs nach Medium (Aufbau des Gehirns und Alzheimer-Demenz) für unterschiedliche Ebenen und Lernsettings (LS) am Beispiel des Alzheimerkoffers. Die LS 1 bis 5 gehören zu Aufbau Gehirn, die LS 6 bis 8 zur Pathologie der Alzheimer-Demenz AD (violett). Dargestellt sind signifikante Unterschiede p, die Effektstärke Cohen's d, der Standardfehler r sowie die Stichprobengröße n.

6.1.2 Art der Steuerung (Forschungsfrage 3): Mitochondrien und Chloroplasten

Um die Lernwirksamkeit unterschiedlicher Steuerungsarten (AR-Steuerung und Touch-Gestensteuerung) (FF3) beurteilen zu können, musste, wie im vorangegangenen Kapitel 6.1.1, die Bedingung der Gruppengleichheit hinsichtlich des Vorwissens zur Vergleichbarkeit des LZ gegeben sein. Sowohl der Mittelwertvergleich (unabhängiger t-Test) mit Einteilung nach den Stammgruppen (A und B) ($t(135) = -.900, p = .370$) als auch der t-Test verbundener Stichproben mit Einteilung nach Steuerungsart (AR- und Touch-Gestensteuerung) ($t(118) = .485, p = .628$) zeigten keine signifikanten Unterschiede bezüglich des Vorwissens auf der Ebene der Unterrichtseinheit (vgl. Tab. 27). Gleiches gilt auf der Ebene von LS9 und LS10 (vgl. Anhang 3.2.1, S. A184 f.).

Die Voraussetzungen und Annahmen zur Durchführung der parametrischen Mittelwertvergleiche wurden wie in Kapitel 5.9.1 beschrieben ermittelt. In dem Datensatz befanden sich keine extremen Ausreißer und Homoskedastizität konnte durch den Levene-Test bestätigt werden, sodass von einer Varianzgleichheit ausgegangen werden konnte. Aufgrund der Gruppengleichheit sowohl im Vergleich der Stammgruppen (A und B) als auch im Vergleich nach eingesetzter Steuerungsart (AR- und Touch-Gestensteuerung) konnte mit den weiteren Analysen, insbesondere mit der Betrachtung des LZ, fortgefahren werden.

Tab. 27: Mittelwertvergleiche des Vorwissens (Mitochondrien und Chloroplasten) mittels t-Test unabhängiger Stichproben* (innerhalb der Stammgruppen A und B) sowie t-Test verbundener Stichproben (AR- und Touch-Gestensteuerung). Stichprobengröße n, Mittelwert M, Standardabweichung SD, Standardfehler r sowie Signifikanz p.**

	Gruppe	n	M	SD	r	p
Vorwissen*	A	69	34.06	18.57	2.24	.370
	B	68	37.13	21.33	2.59	
Vorwissen**	AR	119	37.09	23.63	2.17	.628
	Gesten	119	36.07	21.06	1.93	

Im Fokus der folgenden Betrachtung steht ein Teil der Forschungsfrage FF3 mit der Hypothese, dass die Nutzung einer AR-Steuerung zur Aufgabenbearbeitung im Vergleich zur Touch-Gestensteuerung zu einem höheren LZ führt (FF3 H1). Der LZ wurde für die gesamte Unterrichtseinheit nach Steuerungsart sowie für die einzelnen LS9: Chloroplast und für LS10: Mitochondrium berechnet und mittels t-Test (verbundener bzw. unabhängiger Stichproben) verglichen. Die Annahmen und Voraussetzungen zur Durchführung parametrischer Mittelwertvergleiche wurden wie in Kapitel 5.9.1 beschrieben geprüft und entsprechend berücksichtigt. Für die gesamte Unterrichtseinheit konnte mit dem t-Test unabhängiger Stichproben kein signifikanter Unterschied ($t(107) = -1.584, p = .116$) für den LZ bei unterschiedlichen Steuerungsarten festgestellt werden. Bei der Betrachtung einzelner LS

konnte für LS9 ein signifikanter Unterschied des LZ ($t(109) = -2.130, p = .035, d = .41$) zugunsten der Touch-Gestensteuerung ermittelt werden. Dieser Effekt trat bei LS10 ($t(117) = -1.004, p = .317$) nicht in Erscheinung (vgl. Abb. 27 und Anhang 3.2.1, S. A184 f.). Die Hypothese (FF3 H1), dass die AR-Steuerung zur Aufgabenbearbeitung im Vergleich zur Touch-Gestensteuerung zu einem höheren LZ führt, konnte damit im vorliegenden Untersuchungsszenario nicht angenommen werden.

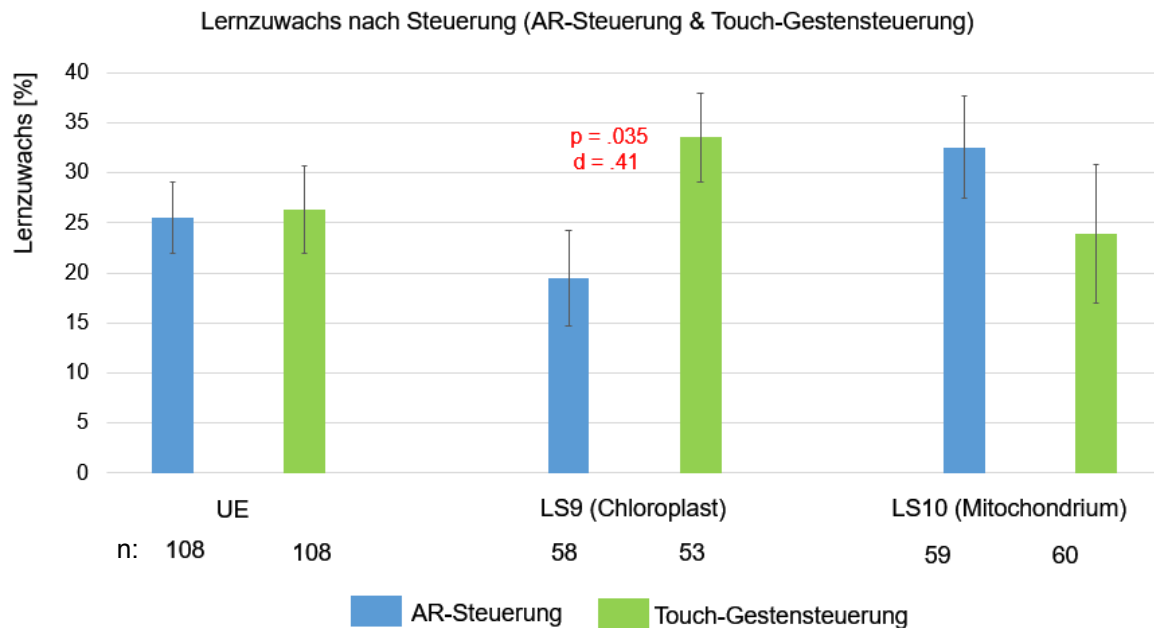


Abb. 27: Relativer Lernzuwachs nach Steuerung (AR- und Touch-Gestensteuerung) für die Unterrichtseinheit Mitochondrien und Chloroplasten sowie für einzelne Lernsettings (LS). Dargestellt sind signifikante Unterschiede p , die Effektstärke Cohens's d , der Standardfehler r sowie die Stichprobengröße n .

6.1.3 Art des Triggers (Forschungsfrage 4): HoloBrain

Der HoloBrain-Studie liegt die Fragestellung zugrunde, ob die Haptik des Triggers (3D-QR-Cube oder 2D-Gehirnscheibe) einen Einfluss auf die Lernwirksamkeit hat, sodass die Nutzung des 3D-QR-Cube zur Aufgabenbearbeitung im Vergleich zur 2D-Gehirnscheibe als Trigger zu einem höheren LZ führt (FF4 H1). Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden im Folgenden die Ergebnisse des Vorwissens und des LZ im selben Kapitel zusammengefasst.

Wie bereits in Kapitel 5.4 (Anpassung der Testinstrumente) detailliert beschrieben, musste zur Erhebung des Vorwissens und des Lernerfolgs auf eine andere Erhebungsplattform ausgewichen werden, was eine Überprüfung der Gruppengleichheit (PH Ludwigsburg und TU Kaiserslautern) und ggf. Anpassungen der Ergebnisse erforderlich gemacht hat. Infolgedessen

wurde nach Prüfung der Annahmen und Voraussetzungen zur Durchführung parametrischer Testverfahren, wie in Kapitel 5.9.1 beschrieben, ein t-Test unabhängiger Stichproben durchgeführt. Demnach schnitt die Gruppe der TU Kaiserslautern ($M = 76,8\%$) im Vorwissenstest signifikant besser ab ($t(59) = -4.085, p < .001$) als die Gruppe der PH Ludwigsburg ($M = 49,1\%$). Die vergleichsweise hohen Testergebnisse des Vorwissenstests haben direkte Auswirkungen auf den LZ, da sich dieser aus der Differenz des Post-Tests und des Vorwissenstests berechnet. Hohe Vorwissensergebnisse führen zu einer Begrenzung des potenziell möglichen LZ.

Um dem Umstand der Gruppenungleichheit zu begegnen, wurde ein Mediansplit anhand des Vorwissens vorgenommen und diejenigen Fälle unterhalb des Medians wurden zur weiteren Analyse ausgewählt. Der t-Test unabhängiger Stichproben zeigte im Fall des Vorwissens, unter Ausschluss der Fälle mit einem hohem Vorwissen, keine signifikanten Unterschiede ($t(32) = -.353, p = .726$) zwischen beiden Gruppen. Analog dazu wurden Mittelwertvergleiche des Vorwissens in Abhängigkeit vom eingesetzten Trigger (QR-Cube oder Gehirnscheibe) durchgeführt. Hierbei konnten weder für die gesamte Stichprobe ($t(59) = .551, p = .584$) noch für die geteilte (untere Stichprobe nach Mediansplit; $t(32) = .597, p = .555$) signifikante Unterschiede festgestellt werden, sodass für die weitere Auswertung des LZ von jeweils gleichen Gruppen ausgegangen werden konnte.

Im direkten Vergleich des LZ in Abhängigkeit vom eingesetzten Trigger (QR-Cube oder Gehirnscheibe) (FF4 H1) konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden – weder für die gesamte Stichprobe ($t(45) = 1.314, p = .195$) noch für die nach Median geteilte Stichprobe ($t(32) = 1.251, p = .220$). Die Ergebnisse sind grafisch in Abb. 28 dargestellt. Demnach spielt die Haptik des Triggers in dem beschriebenen Untersuchungsszenario keine übergeordnete Rolle hinsichtlich des LZ, sodass mit dem dreidimensionalen Trigger (3D-QR-Cube) ähnlich hohe LZ erreicht wurden wie mit dem zweidimensionalen Trigger (2D-Gehirnscheibe).

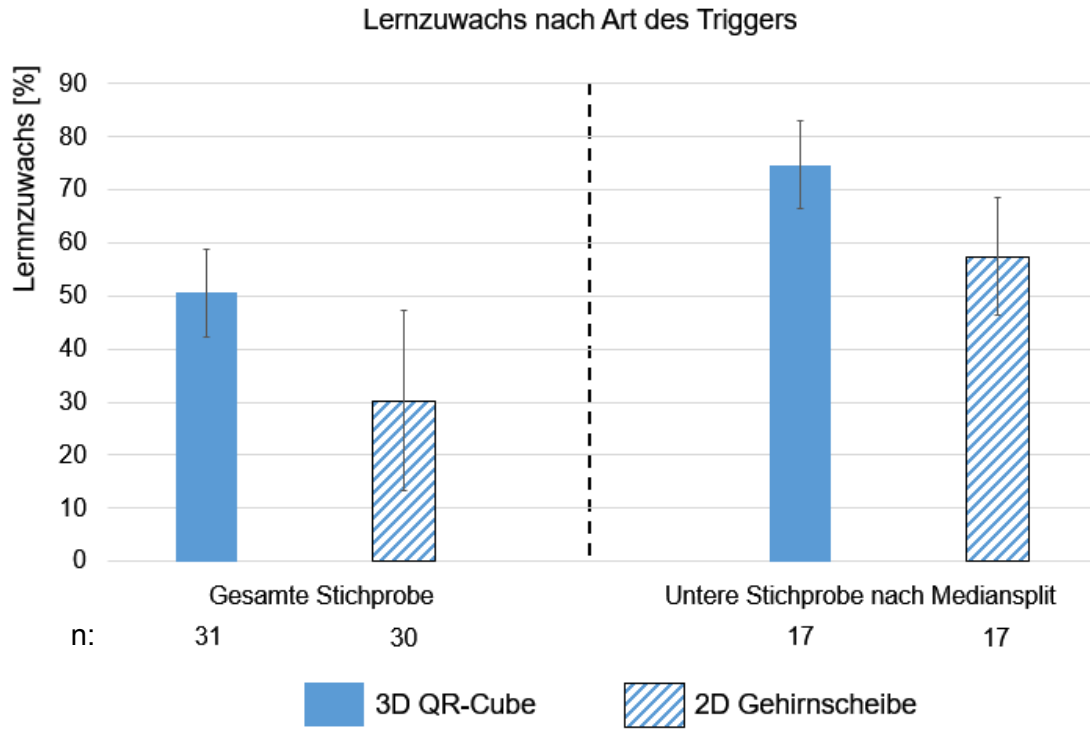


Abb. 28: Relativer Lernzuwachs nach Art des Triggers (3D-QR-Cube oder 2D-Gehirnscheibe) bei der HoloBrain-Studie für die gesamte Stichprobe sowie für die untere Stichprobe nach Mediansplit. Dargestellt sind der Standardfehler r sowie die Stichprobengröße n .

6.2 Cognitive Load

Der Cognitive Load stellt aufgrund der verwendeten Testinstrumente (vgl. Kapitel 5.9.2) eine subjektive Messgröße dar. Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, lässt er sich in verschiedene Cognitive Loads (ICL, ECL und GCL) differenzieren. Nachdem im vorherigen Kapitel 6.1 der Frage nachgegangen wurde, welchen Einfluss AR auf den LZ hat, wird in diesem Kapitel der Fokus auf Elemente der CLT gelegt, um damit ggf. die beschriebenen Unterschiede des LZ in Kapitel 7.2.2 erklären und beurteilen zu können. In den Folgekapiteln werden daher sowohl etwaige Unterschiede hinsichtlich der Cognitive Loads herausgearbeitet als auch Zusammenhangsanalysen (Strukturgleichungsmodellierung und multiple lineare Regression) zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen der CLT und dem LZ durchgeführt.

6.2.1 Art des Mediums (Forschungsfragen 1 und 2): Aufbau des Gehirns und Alzheimer-Demenz

In diesem Kapitel wird in einem ersten Schritt der Frage nachgegangen, ob der Einsatz von AR zur Aufgabenbearbeitung im Biologieunterricht einen anderen Einfluss auf den CL hat als die Nutzung von EUM? (FF2 H2 bis FF2 H5). Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Strukturgleichungsmodellierung dargestellt, um empirische Rückschlüsse auf das theoretische Modell der CLT zu ermöglichen (FF1 H1 bis FF1 H3) und den theoretischen Zusammenhang zum LZ herzustellen (FF1 H4 bis FF1 H6).

Um eventuelle Unterschiede der Cognitive Loads in Abhängigkeit vom eingesetzten Medium aufzuzeigen, wurden t-Tests unabhängiger und verbundener Stichproben verwendet. Die notwendigen Annahmen und Voraussetzungen zum Einsatz parametrischer Testverfahren wurden, wie in Kapitel 5.9.1 beschrieben, geprüft und berücksichtigt. Es wurden acht Fälle von extremen Ausreißern (dreifacher Interquartilsabstand) von den weiteren Berechnungen ausgeschlossen. Weiterhin konnten in vier Mittelwertvergleichsanalysen (LS1: ECL, LS3: CL, LS7: ICL und ECL) die Voraussetzungen der Varianzhomogenität durch den Levene-Test nicht bestätigt werden, sodass der robustere Welch-Test in diesen Szenarien vorgezogen wurde.

Die Berechnung der unterschiedlichen CL-Dimensionen erfolgte auf Grundlage der in Kapitel 5.9.2 beschriebenen Ergebnisse der konfirmatorischen Faktorenanalyse. Zusätzlich zu dem von Leppink et al. (2013; 2014) entwickelten Testinstrument zur Erfassung des ICL, des ECL und des GCL wurde das von Paas (1992) entwickelte Item zur Erfassung des CL in die Mittelwertvergleiche einbezogen.

Der Vergleich der CL in Abhängigkeit vom eingesetzten Medium erfolgte analog zum Vergleich des LZ in Kapitel 6.1.1 auf unterschiedlichen Ebenen: beide Unterrichtseinheiten, einzelne Unterrichtseinheit sowie einzelne LS (vgl. Abb. 29 und Anhang 3.2.2, S. A185). Es konnten für

den CL (FF2 H2) statistisch signifikante Unterschied zwischen AR und EUM in LS5 ($t(338) = 3.11, p = .002, d = .34$) in LS6 ($t(245) = -3.89, p < .001, d = .50$) in LS7 ($t(238) = 2.40, p = .017, d = .31$) sowie in LS8 ($t(238) = -2.57, p = .011, d = .33$) festgestellt werden. In den Fällen von LS6 und LS8 fiel der CL höher für EUM aus, während dieser in LS5 und LS7 für AR höher lag. Weiterhin gab es für den ICL (FF2 H3) statistisch signifikante Unterschiede zwischen AR und EUM in LS5 ($t(341) = 3.26, p < .001, d = .37$) in LS6 ($t(247) = -3.19, p = .002, d = .41$) sowie in LS8 ($t(241) = -2.81, p = .005, d = .36$), wobei der ICL in LS6 und in LS8 höher für EUM ausfiel, während dieser in LS5 für AR höher lag.

Für den ECL (FF2 H4) bestand ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen AR und EUM in LS5 ($t(341) = 3.39, p = .001, d = .35$). Dieser fiel bei AR höher aus als bei EUM. Darüber hinaus konnte für den GCL (FF2 H5) ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen AR und EUM in der Unterrichtseinheit *Pathologie der Alzheimer-Demenz* ($t(240) = 2.15, p = .032, d = .28$) festgestellt werden. Dieser fiel bei EUM höher aus als bei AR.

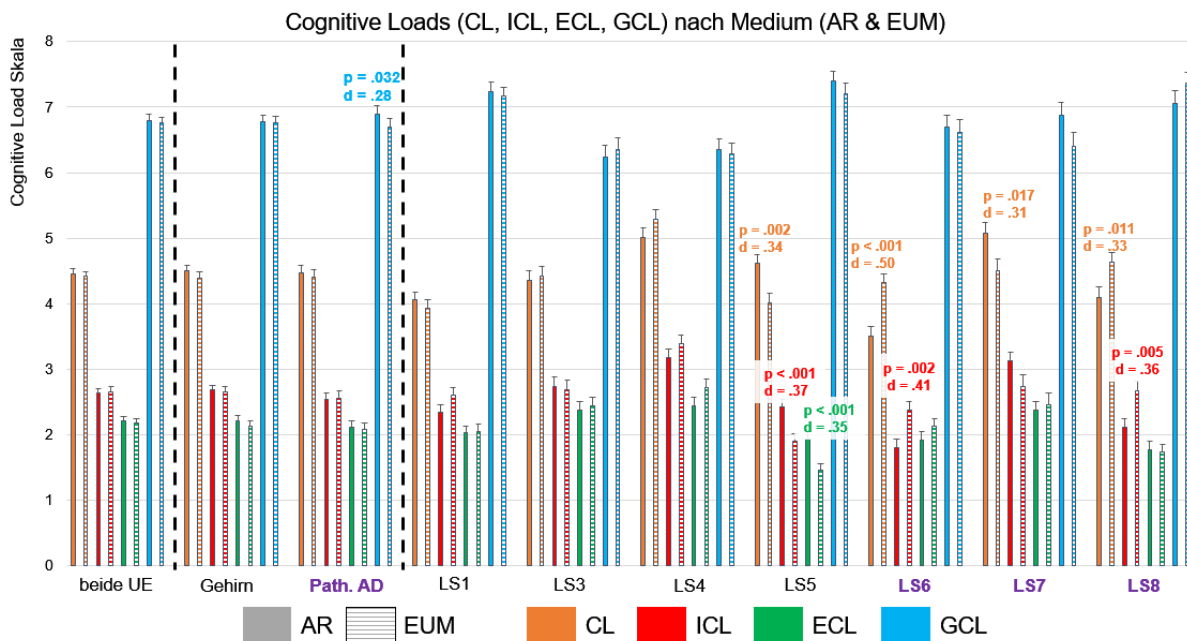


Abb. 29: Cognitive Loads nach Medium (AR & EUM) für unterschiedliche Ebenen und Lernsettings (LS) am Beispiel des Alzheimerkoffers. Die LS 1 bis 5 gehören zu Aufbau Gehirn, die LS 6 bis 8 zu Pathologie der Alzheimer-Demenz (violett). Dargestellt sind signifikante Unterschiede p , die Effektstärke Cohen's d sowie der Standardfehler r .

Damit ergibt sich für die Betrachtung des Cognitive Loads im Vergleich von AR und EUM ein heterogenes Bild, sodass einerseits der ECL und damit auch der CL durch den Einsatz von AR nicht zwingend gesenkt werden kann und andererseits der GCL nicht zwangsweise erhöht wird. Die Ergebnisse verdeutlichen jedoch die Bedeutung einer genauen Betrachtung der LS

und zeigen auf, dass AR in den meisten Fällen mit EUM hinsichtlich des Cognitive Loads konkurrieren kann.

Basierend auf den Ergebnissen der konfirmatorischen Faktorenanalyse (vgl. Kapitel 5.9.2) wurde ein Messmodell zur Operationalisierung der latenten Variablen ICL, ECL und GCL entwickelt. Dieses wurde im Rahmen einer Strukturgleichungsmodellierung mit dem LZ in Bezug gesetzt, um kausale Zusammenhänge zwischen der CLT und dem LZ aufzuzeigen und Erklärungsansätze zur Interpretation der bisher dargelegten Ergebnisse zu ermöglichen. Dem Strukturgleichungsmodell liegen die beschriebenen Zusammenhänge der CLT (vgl. Kapitel 2.3) und die daraus abgeleiteten Annahmen (FF1 H1 bis FF1 H6) zugrunde.

Das resultierende Strukturgleichungsmodell, basierend auf $n = 407$, weist einen sehr guten Model-Fit mit $p(X^2) = .29$, $CFI = .998$, $TLI = .998$, $RMSEA = .0014$ und $SRMR = .054$ auf und ist in Abb. 30 als Pfaddiagramm mit farblich hervorgehobenen Pfaden für signifikante Zusammenhänge dargestellt. Weitere statistische Kenngrößen zu den Pfadkoeffizienten und der Kovarianz des Modells sind in Tab. 28 aufgeführt.

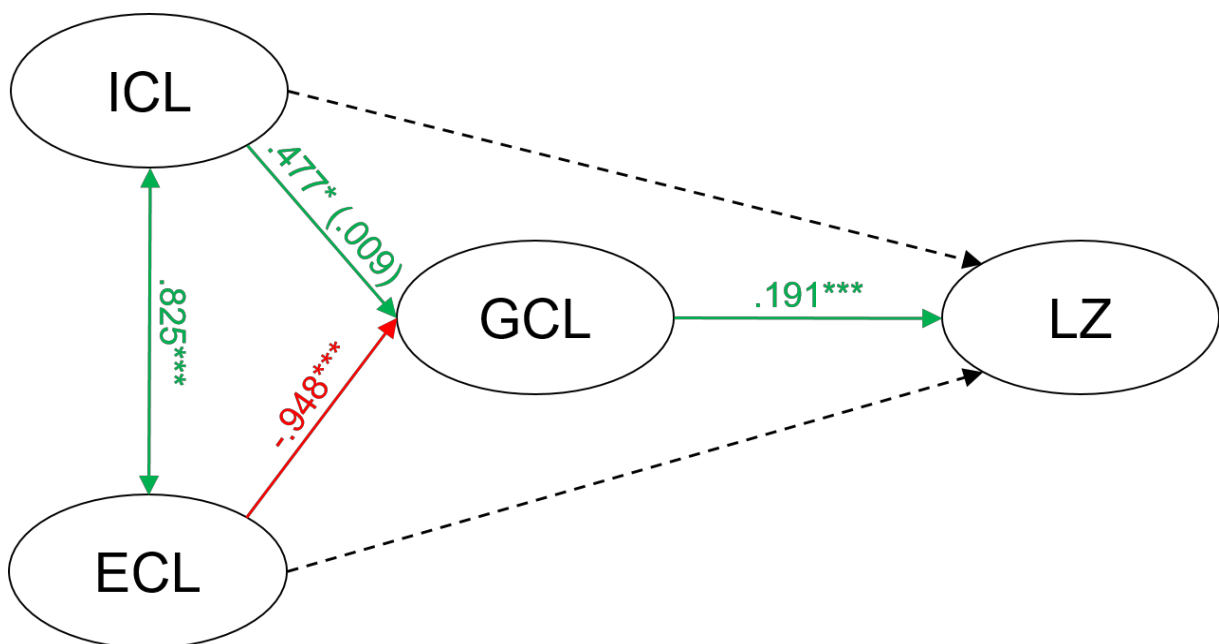


Abb. 30: Strukturgleichungsmodell (CLT und LZ) mit farblich gekennzeichneten signifikanten Pfaden (rot = negative Zusammenhänge, grün = positive Zusammenhänge). Kovarianz zwischen ICL und ECL sowie β -standardisierte Pfadkoeffizienten zwischen den übrigen Faktoren. Model-Fit: $p(X^2) = .29$, $CFI = .998$, $TLI = .998$, $RMSEA = .0014$, $SRMR = .054$.

Tab. 28: Pfadkoeffizienten und Kovarianz der Strukturgleichungsmodellierung (CLT und LZ) mit n = 407. Nicht standardisierte Schätzung b; Standardfehler r; Standardabweichung vom Mittelwert z, Signifikanz p, standardisierte Schätzung β ; Kovarianzmatrix*.

Zielkonstrukt	Prädiktor	b	r	z	p	β
LZ	ECL	-1.901	2.500	-.761	.447	-.097
LZ	ICL	-.956	2.059	-.642	.642	-.060
LZ	GCL	3.238	.461	7.027	< .001***	.191
GCL	ICL	.452	.173	2.614	.009**	.477
GCL	ECL	-1.105	.225	-4.912	< .001***	-.948
ICL*	ECL*	2.597	.157	16.567	< .001***	.822

Das Strukturgleichungsmodell zeigt über die hohe Kovarianz die enge Beziehung zwischen dem ICL und der ECL sowie die geeignete Prädiktion (über die signifikanten Pfadkoeffizienten) beider latenten Variablen für den GCL. Darüber hinaus stellt der GCL einen wesentlichen Prädiktor für den LZ dar. Für den ICL und den ECL konnte hingegen kein direkter prädiktiver Zusammenhang für den LZ festgestellt werden.

6.2.2 Art der Steuerung (Forschungsfragen 1 und 3): Mitochondrien und Chloroplasten

In diesem Kapitel wird zunächst der Frage nachgegangen, ob die Art der Steuerung einen Einfluss auf den Cognitive Load hat (FF3 H2 bis FF3 H5). Darüber hinaus werden die Ergebnisse der multiplen (und einfachen) linearen Regression dargestellt, um Zusammenhänge zwischen den einzelnen Cognitive-Load-Dimensionen zu überprüfen (FF1 H1 bis FF1 H3) und mögliche Prädiktoreffekte auf den LZ zu ermitteln (FF1 H4 bis FF1 H6).

Um eventuelle Unterschiede der CL in Abhängigkeit von der eingesetzten Steuerungsart aufzuzeigen, wurden, wie bereits im vorherigen Kapitel 6.2.1, t-Tests unabhängiger und verbundener Stichproben verwendet. Die notwendigen Annahmen und Voraussetzungen zum Einsatz parametrischer Testverfahren wurden zuvor geprüft und wie in Kapitel 5.9.1 beschrieben durchgeführt und berücksichtigt. Es wurden zwei Fälle von extremen Ausreißern (dreifacher Interquartilsabstand) von den weiteren Berechnungen ausgeschlossen. Die Voraussetzung der Homoskedastizität lag in allen Untersuchungsszenarien vor.

Die Berechnung der unterschiedlichen CL-Dimensionen erfolgte auf Grundlage der in Kapitel 5.9.2 beschriebenen Ergebnisse der konfirmatorischen Faktorenanalyse. Wie bereits in Kapitel 6.2.1 beschrieben, wurde zu dem von Leppink et al. (2013; 2014) entwickelten Testinstrument das von Paas (1992) entwickelte Item zur Erfassung des CL in die Mittelwertvergleiche einbezogen.

Der Vergleich der CL-Dimensionen in Abhängigkeit von der Steuerungsart erfolgte auf der Ebene der Unterrichtseinheit sowie auf der Ebene einzelner LS. Es konnte in keinem der

untersuchten Szenarien ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Steuerungsart und der CL-Dimensionen festgestellt werden. Die Ergebnisse sind detailliert in Abb. 31 dargestellt. Sie zeigen, dass der Einsatz einer AR-Steuerung im Vergleich zur weit verbreiteten Touch-Gestensteuerung zu keinen nachteiligen Effekten hinsichtlich des CL führt (FF3 H2 bis FF3 H5).

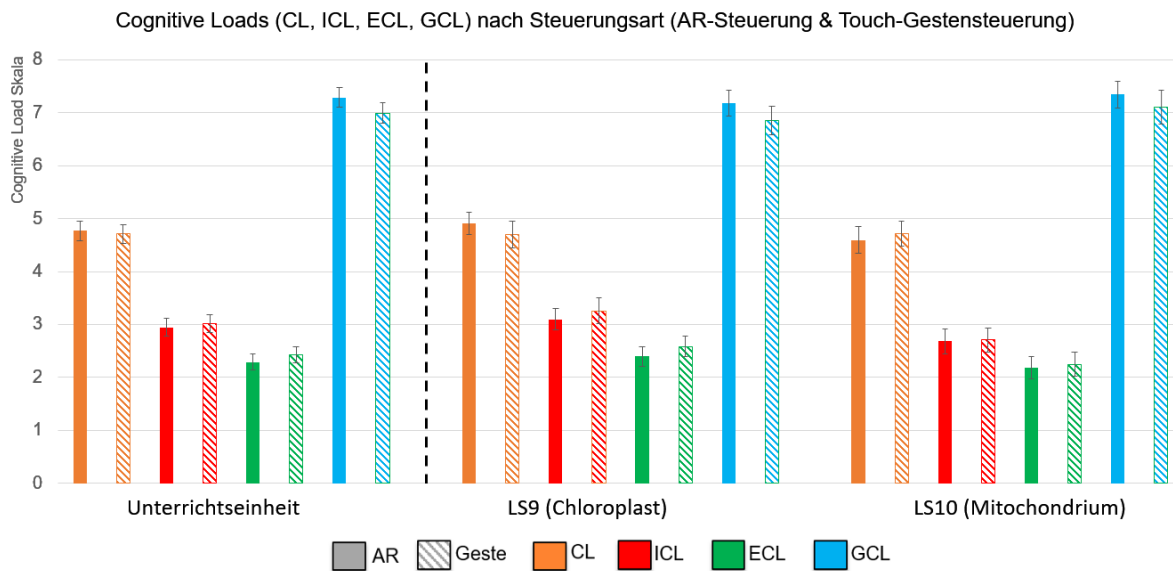


Abb. 31: Cognitive Loads nach Steuerungsart (AR und Gestensteuerung) für die Unterrichtseinheit und Lernsettings (LS) am Beispiel des Aufbaus von Mitochondrien und Chloroplasten mit Standardfehler r.

Da sich aufgrund der Stichprobengröße eine Strukturgleichungsmodellierung (vgl. Kapitel 6.2.2) nicht empfahl, wurde zur Aufklärung möglicher Zusammenhänge innerhalb der CL-Dimensionen das statistische Verfahren der multiplen linearen Regression verwendet. Gemäß der theoretischen Grundannahmen wurde davon ausgegangen, dass der ICL und der ECL Prädiktoren für den GCL darstellen. Die Linearität der Variablen wurde grafisch geprüft. Weiterhin konnten weder über den dreifachen Interquartilsabstand die Hebelwerte noch über die Cook-Distanzen innerhalb der Stichprobe Ausreißer identifiziert werden.

Die Überprüfung auf Autokorrelation der Residuen wurde mittels Durbin-Watson-Test durchgeführt und weist mit 1.738 einen akzeptablen Wert auf, sodass nicht von einer Autokorrelation auszugehen war. Zur Bestimmung, ob eine Multikollinearität vorliegt, wurden die Prädiktoren hinsichtlich ihrer Korrelation sowie ihrer Varianzinflationsfaktoren (VIF) untersucht. Es konnte eine Interkorrelation von .737 und es konnten VIF-Werte von 2.187 festgestellt werden. Beides deutete darauf hin, dass eine Interkorrelation der Prädiktoren vorliegt. Da die VIF-Werte < 5 sind, konnte dennoch davon ausgegangen werden, dass die

Regressionskoeffizienten zuverlässig geschätzt werden konnten. Die Homoskedastizität wurde grafisch geprüft und liegt vor. Das Modell weist mit $R^2 = .209$ (korr. $R^2 = .196$) eine moderate Anpassungsgüte auf. Darüber hinaus ist das Modell in der Lage, mit den Prädiktoren ICL und ECL statistisch signifikant den GCL ($F(2, 127) = 16.75, p < .001$) vorherzusagen. Die Regressionskoeffizienten sind in Tab. 29 dargestellt.

Tab. 29: Ergebnisse der multiplen linearen Regression (CLT). Regressionskoeffizienten B, Standardfehler r, standardisierte Koeffizienten β , Signifikanz p, unteres und oberes 95%-Konfidenzintervall 95%-KI.

	B	r	β	p	95%-KI
ICL	.091	.117	.091	.437	[-.141, .324]
ECL	-.608	.137	-.520	.000	[-.879, -.338]

Da die Prädiktoren ICL und ECL die gleiche Einheit wie GCL besitzen, konnte auf den nicht standardisierten Regressionskoeffizienten B zurückgegriffen werden. Demnach hat der ICL keinen signifikanten Einfluss auf die Vorhersage des GCL. Der ECL hingegen beeinflusst den GCL mit $B = -.608, p < .001$ negativ, sodass eine Erhöhung des ECL zu einer Verringerung des GCL führt.

Infolgedessen wurde der ICL aus der Regressionsanalyse entfernt und es wurde eine einfache lineare Regression mit ECL als Prädiktor für den GCL durchgeführt. Der Durbin-Watson-Test wies mit 1.75 ebenfalls einen akzeptablen Wert auf, sodass von keiner Autokorrelation auszugehen war. Das Modell hat mit $R^2 = .205$ (korr. $R^2 = .199$) eine annähernd identische moderate Anpassungsgüte, sodass mit einem Prädiktor etwa die gleiche Varianz aufgeklärt werden kann. Der Einfluss des ECL auf den GCL über den Regressionskoeffizienten B fällt mit $-.530, p < .001$ etwas geringer aus als bei der multiplen linearen Regression, sodass mit jeder Steigerung des ECL um den Wert 1 der GCL um .53 sinkt.

Da in LS9 signifikante Unterschiede im LZ feststellbar waren, wurde eine weitere multiple lineare Regression durchgeführt, um mögliche CL-Effekte auf den LZ aufzuklären. Nach Prüfung der Voraussetzungen beinhalteten die Daten weder Ausreißer noch lag eine Autokorrelation vor (Durbin-Watson = 1.762). Das Modell weist jedoch eine geringe Anpassungsgüte von $R^2 = .014$ auf und ist mit $F(3, 106) = .517, p = .671$ nicht signifikant, sodass in diesem Fall eine Prädiktion des LZ durch die einzelnen Cognitive-Load-Dimensionen nicht möglich war.

6.2.3 Art des Triggers (Forschungsfrage 4): HoloBrain

Auch wenn der Schwerpunkt der Detailstudie zur HoloBrain-App auf der Erfassung der Immersion von AR-Lernumgebungen liegt, bietet die Betrachtung des Cognitive Loads in Abhängigkeit von unterschiedlichen Triggern ein weiteres spannendes Forschungsfeld. Daher wird in diesem Kapitel der Frage nachgegangen, inwiefern die Art eines haptischen Triggers (3D-QR-Cube oder 2D-Gehirnscheibe) Einfluss auf den Cognitive Load hat (FF4 H2 bis FF4 H4). Darüber hinaus befasst sich die Detailstudie mit der Frage, welchen Einfluss die mediale Repräsentation (AR-Hirnmodell und Papiermodell) hinsichtlich des Cognitive Loads hat (FF5 H2 bis FF5 H4).

Aufgrund der begrenzten Stichprobenzahl ($n = 28$) sowie der teilweise nicht normalverteilten Daten (ermittelt über den Shapiro-Wilk-Test) wurden zwecks Mittelwertvergleich nicht parametrische Testverfahren verwendet. Um die Mediane beider Gruppen vergleichen zu können, wurden die z-standardisierten Werte der abhängigen Variablen (ICL, ECL, GCL) mittels Kolmogorov-Smirnov-Test auf ihre Verteilung hin überprüft. Es konnte für alle drei Dimensionen von einer gleichen Gruppenverteilung (ICL: $p = .705$, ECL: $p = .547$, GCL: $p = .402$) ausgegangen werden, sodass die Mediane miteinander verglichen werden konnten.

Der Mann-Whitney-U-Test wurde durchgeführt, um zu überprüfen, ob sich die einzelnen Cognitive-Load-Dimensionen hinsichtlich der eingesetzten Triggerart unterscheiden. Dabei konnte lediglich ein signifikanter Unterschied im ICL beim Einsatz der 2D-Gehirnscheibe (Mdn = 3.66) bzw. des 3D-QR-Cubes (Mdn = 1.66) als Trigger ($U = 41.00$, $Z = -2.616$, $p = .008$, $\eta^2 = .25$) festgestellt werden. Die Ergebnisse sind grafisch in Abb. 32 und detailliert im Anhang (Anhang 3.2.3, S. A187) dargestellt.

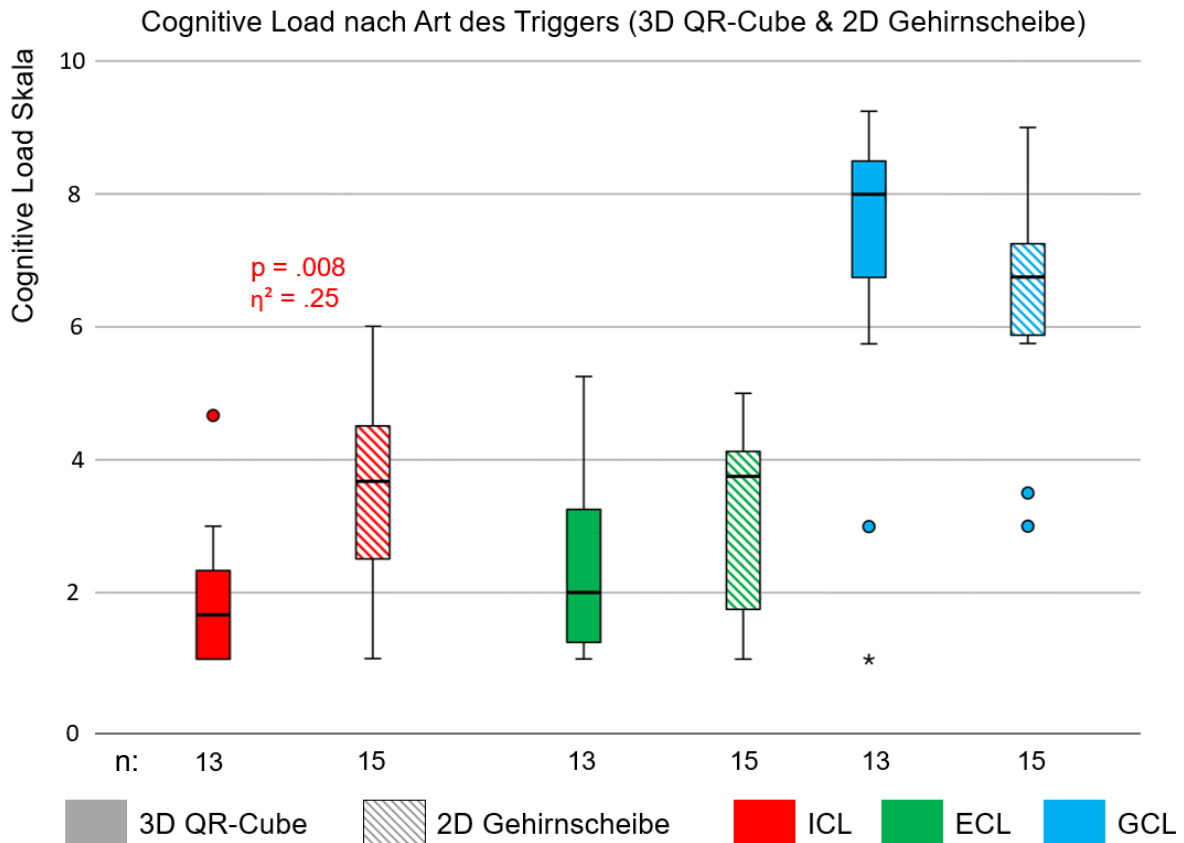


Abb. 32: Cognitive Load nach Art des Triggers (3D-QR-Cube und 2D-Gehirnscheibe) für die HoloBrain-Studie. Boxplot-Diagramm mit Median, Quartile, Ausreißer, signifikante Unterschiede p , Determinationskoeffizient η^2 sowie Stichprobengröße n .

Die identifizierten Unterschiede im ICL zeigen, dass sich beide Trigger hinsichtlich ihrer inhaltlichen Komplexität unterscheiden, sich diese Unterschiede aber nicht im GCL niederschlagen, sodass Lernen trotz höherem ICL bei der 2D-Gehirnscheibe ungehindert stattfinden kann. Ferner scheint die Haptik des Triggers (2D vs. 3D) hinsichtlich des ECL eine untergeordnete Rolle zu spielen.

6.2.4 Art der medialen Repräsentation (Forschungsfrage 5): HoloBrain

Zum Vergleich der Cognitive-Load-Dimensionen zwischen dem digitalen AR-Hirnmodell und dem Papiermodell wurde der Wilcoxon-Test verbundener Stichproben verwendet. Es konnten für den ECL signifikante Unterschiede ($z = -2.102$, $p = .036$, $n = 27$, $\eta^2 = .08$) zwischen dem AR-Hirnmodell (Mdn = 3.125) und dem Papiermodell (Mdn = 3.25) festgestellt werden. Weiterhin ist der GCL des AR-Hirnmodells (Mdn = 7) signifikant höher ($z = -2.732$, $p = .006$, $n = 27$, $\eta^2 = .14$) als der des Papiermodells (Mdn = 7). Die Ergebnisse sind grafisch in Abb. 33 und detailliert im Anhang (Anhang 3.2.3, S. A187) dargestellt.

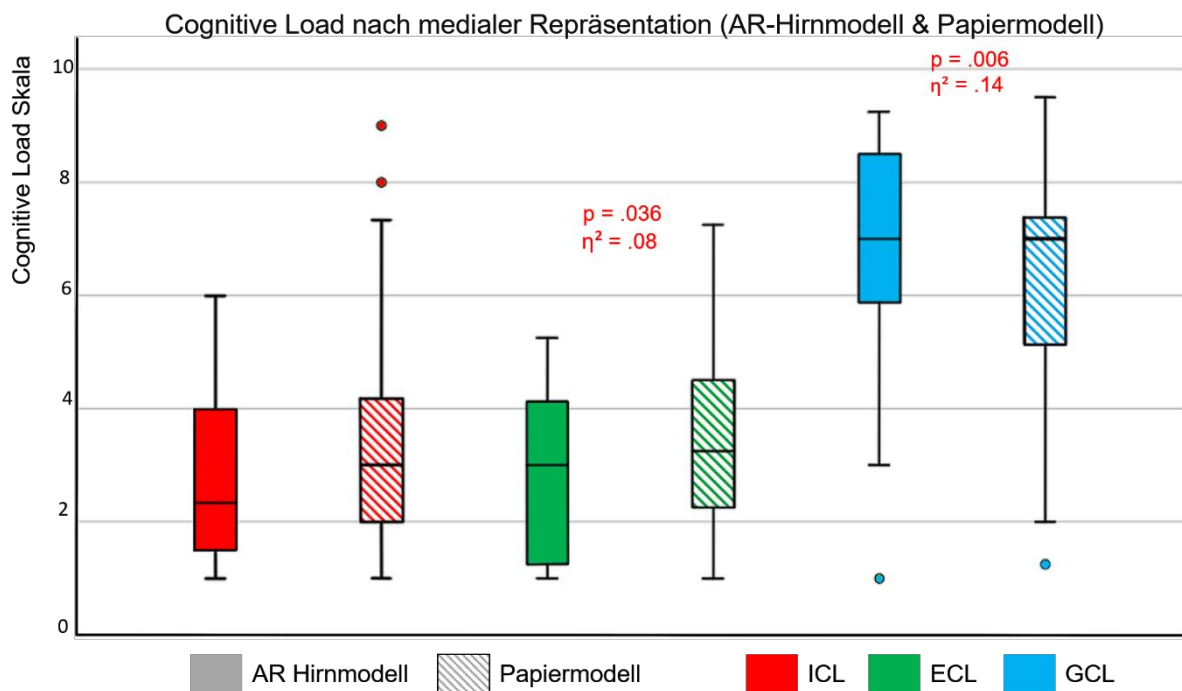


Abb. 33: Cognitive Load nach medialer Repräsentation (AR-Hirnmodell und Papiermodell) für die HoloBrain-Studie. Boxplot-Diagramm mit Median, Quartile, Ausreißer, signifikante Unterschiede p sowie Determinationskoeffizient η^2 . $n = 27$.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Art der medialen Repräsentation einen Einfluss aus den ECL und den GCL hat, sodass der Einsatz des AR-Hirnmodells im Vergleich zum Einsatz eines analogen Papiermodells zu einem geringeren ECL führt. Der niedrigere ECL wirkt sich positiv auf den GCL – und damit auf das Lernen – aus.

6.3 Nutzungserlebnis

Bei der UX handelt es sich um eine subjektive Messgröße, die mittels geeigneter Messinstrumente erfasst werden kann. Wie bereits in den Kapiteln 2.4 und 5.9.3 beschrieben, wurde hierzu der UEQ genutzt, mit dem unterschiedliche Dimensionen der UX differenziert werden. Somit lassen die folgenden Ergebnisse eine multidimensionale Beschreibung der UX der jeweiligen Apps zu und setzen diese durch einen Benchmark-Vergleich in Bezug zu vergleichbaren digitalen Produkten. Darüber hinaus werden unterschiedliche App-Versionen der Studien dieser Arbeit miteinander verglichen und theoretische Zusammenhänge mit der CLT werden aufgezeigt.

6.3.1 Art des Mediums (Forschungsfragen 1 und 2): Aufbau des Gehirns und Alzheimer-Demenz

In diesem Kapitel wird in einem ersten Schritt der Frage nachgegangen, ob der Einsatz von AR im Vergleich zu EUM zur Aufgabenbearbeitung im Biologieunterricht zu Unterschieden innerhalb der UX führt (FF2 H6). Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Strukturgleichungsmodellierung dargestellt, um empirische Rückschlüsse auf das theoretische Modell der CLT und der UX zu ermöglichen (FF1 H7, FF1 H8). Zunächst erfolgt jedoch eine Charakterisierung der UX der eingesetzten AR-App anhand des UEQ-Benchmark-Vergleichs. Anschließend wird mittels Strukturgleichungsmodellierung untersucht, ob sich ein praktischer Zusammenhang zwischen der multidimensionalen UX und der CLT zum Nachweis der Lernwirksamkeit bestätigen lässt.

Für die weiteren Analysen wurden die Daten, unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.9.3 beschriebenen Kriterien, auf inkonsistentes Antwortverhalten geprüft. Es konnten $n = 240$ gültige Fälle genutzt werden. Entsprechend der dargestellten Ergebnisse in Abb. 34 zeigt die App in der Dimension Originalität exzellente, in den Dimensionen Attraktivität, Durchschaubarkeit, Effizienz und Stimulation überdurchschnittliche und in der Dimension Steuerbarkeit unterdurchschnittliche Ergebnisse. Damit liegt die App in der Dimension Originalität im Ergebnisbereich der besten 10 %, in den Dimensionen Attraktivität, Durchschaubarkeit, Effizienz und Stimulation schneiden 25 % der digitalen Anwendungen besser und 50 % schlechter ab. Lediglich in der Dimension Steuerbarkeit sind 50 % besser und 25 % schlechter.

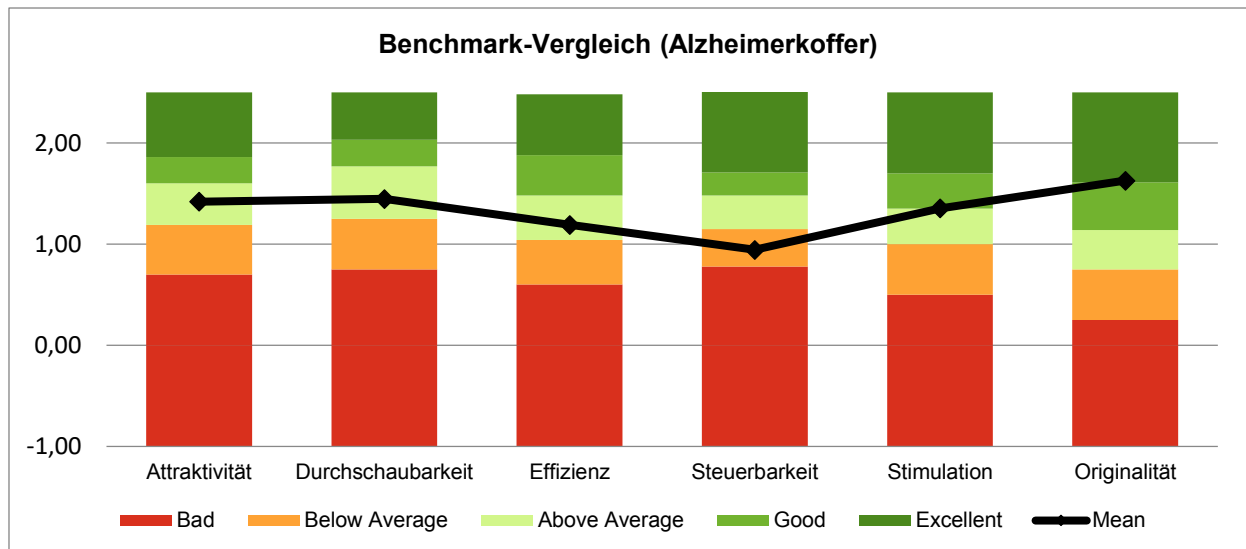


Abb. 34: Ergebnisse des Benchmark-Vergleichs (Gehirn-AR-App). Referenzdaten: Schrepp, 2018a.

Auf Grundlage der konfirmatorischen Faktorenanalysen der Antwortmuster der verwendeten Instrumente (vgl. Kapitel 5.9.2 und Kapitel 5.9.3) sowie der in Kapitel 2.4 dargelegten theoretischen Zusammenhänge zwischen der CLT und der UX wurden die kausalen Zusammenhänge beider Messmodelle in ein Strukturgleichungsmodell transferiert. Als Datengrundlage der CLT wurden die Mittelwerte aller LS für AR-Szenarien gewählt, da diese im direkten Bezug zur erfassten UX mit der AR-App stehen. Das resultierende Strukturgleichungsmodell ist als Pfaddiagramm in Abb. 35 dargestellt und zeigt mit 11 Freiheitsgraden einen guten Model-Fit ($p(X^2) = .06$, CFI = .981, TLI = .965, RMSEA = .053, SRMR = .056). Die Fit-Indices liegen damit außerhalb der von Hu und Bentler (1999) postulierten Cut-off-Kriterien, sodass von einem guten Fit zwischen dem hypothetischen Modell und den beobachteten Daten ausgegangen werden kann. Weitere statistische Kenngrößen zu den Pfadkoeffizienten und der Kovarianz des Modells sind in Tab. 30 aufgeführt.

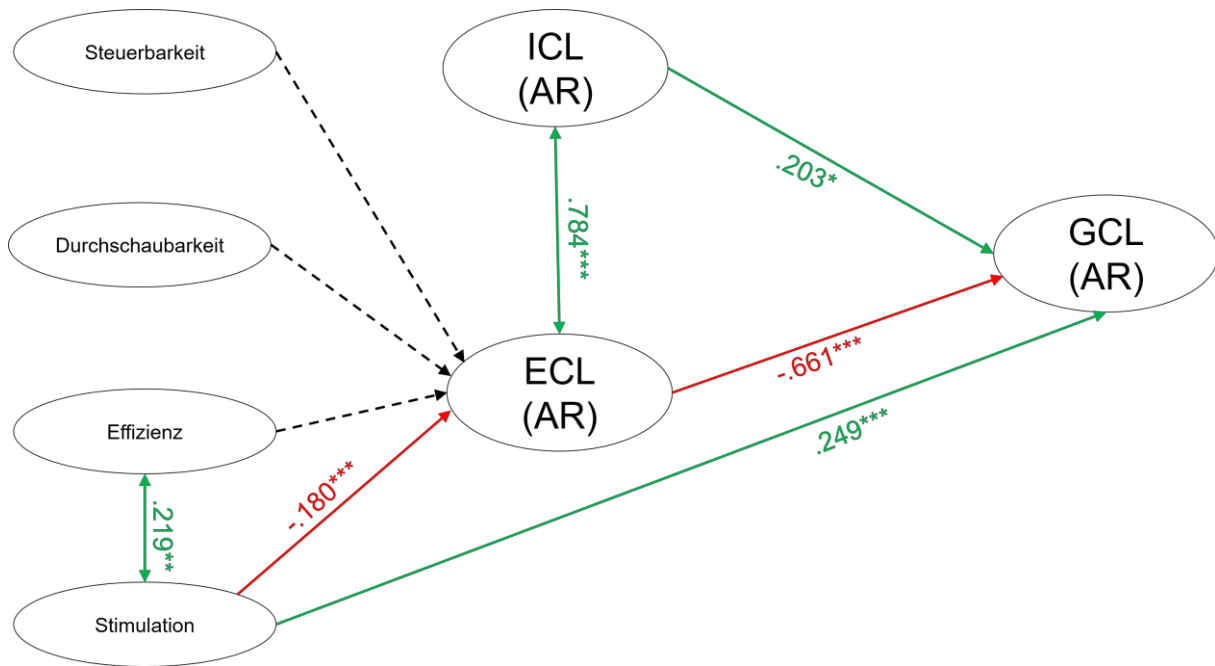


Abb. 35: Strukturgleichungsmodell (CLT und UEQ), basierend auf den Daten der Alzheimerkoffer-Studie mit farblich gekennzeichneten signifikanten Pfaden (rot = negative Zusammenhänge, grün = positive Zusammenhänge). Kovarianz zwischen ICL/ECL und Effizienz/Stimulation sowie β -standardisierte Pfadkoeffizienten zwischen den übrigen Faktoren. Model-Fit: $p(X^2) = .06$, CFI = .981, TLI = .965, RMSEA = .053, SRMR = .056.

Tab. 30: Pfadkoeffizienten und Kovarianz der Strukturgleichungsmodellierung (CLT und UEQ) mit $n = 240$. Nicht standardisierte Schätzung b ; Standardfehler r ; Standardabweichung vom Mittelwert z , Signifikanz p , standardisierte Schätzung β ; Kovarianzmatrix*.

Zielkonstrukt	Prädiktor	b	r	z	p	β
GCL	ECL	-.896	.118	-7.61	< .001***	-.661
GCL	ICL	.271	.116	2.35	.019*	.203
GCL	Stimulation	.290	.059	4.90	< .001***	.249
ECL	Stimulation	-.155	.033	-4.69	< .001***	-.180
ECL	Steuerbarkeit	.026	.083	.31	.758	.014
ECL	Durchschaubarkeit	-.076	.076	-1.00	.317	.036
ECL	Effizienz	-.100	.065	-1.58	.122	-.054
ICL*	ECL*	1.277	.210	6.10	< .001***	.784
Stimulation*	Effizienz*	.244	.084	2.68	.007**	.219

Das Strukturgleichungsmodell zeigte bezüglich der CLT ein mit den in Kapitel 6.2.1 vorgestellten Ergebnissen vergleichbares Muster. Die hohe Kovarianz beschreibt die enge Beziehung zwischen dem ICL und der ECL sowie die geeignete Prädiktion (über die signifikanten Pfadkoeffizienten) beider latenten Variablen für den GCL. Während für die Steuerbarkeit, Durchschaubarkeit und Effizienz keine Prädiktoreigenschaften für den ECL festgestellt wurden, lassen sich der ECL und der GCL über die Dimension der Stimulation teilweise voraussagen, sodass eine höhere Stimulation zu einer Reduktion des ECL und einer

Erhöhung des GCL führt. Darüber hinaus zeigte sich über die Kovarianz ein nicht gerichteter, signifikanter Zusammenhang zwischen der Effizienz und der Stimulation. Somit stellte sich vor allem die Dimension der Stimulation als theoriekonform heraus, da sie eine zentrale Einflussgröße für den ECL und den GCL ist.

6.3.2 Art der Steuerung (Forschungsfrage 1 und 3): Mitochondrien und Chloroplasten

In dem vorliegenden Kapitel wird den Fragen nachgegangen, welchen Einfluss die Art der Steuerung auf die UX hat (FF3 H6), ob die dargestellten 3D-Modelle einen Einfluss auf die UX haben und ob sich der im vorangegangenen Kapitel 6.3.1 mittels Strukturgleichungsmodellierung nachgewiesene Zusammenhang zwischen der UX und der CLT in der vorliegenden Studie durch eine MANOVA bestätigen lässt (FF1 H7, FF1 H8). Doch zunächst wird die eingesetzte AR-App durch den Benchmark-Vergleich charakterisiert.

Als Erstes wurden die Daten auf inkonsistentes Antwortverhalten geprüft und die Items der einzelnen Dimensionen wurden einer Reliabilitätsanalyse unterzogen (vgl. Kapitel 5.9.3), sodass für LS9 $n = 122$, für LS10 $n = 120$ und für die Gesamtbeurteilung der AR-App $n = 124$ gültige Fälle zur weiteren Analyse genutzt werden konnten. Der Benchmark-Vergleich erfolgte analog zu dem in Tab. 17 (S. 122) dargestellten Auswertungsschema, basierend auf den Daten der Gesamtbeurteilung der AR-App. Entsprechend der Darstellung in Abb. 36 erreicht die AR-App in den Dimensionen Attraktivität, Stimulation und Originalität exzellente, in den Dimensionen Durchschaubarkeit und Effizienz gute und in der Dimension Steuerbarkeit überdurchschnittliche Werte.

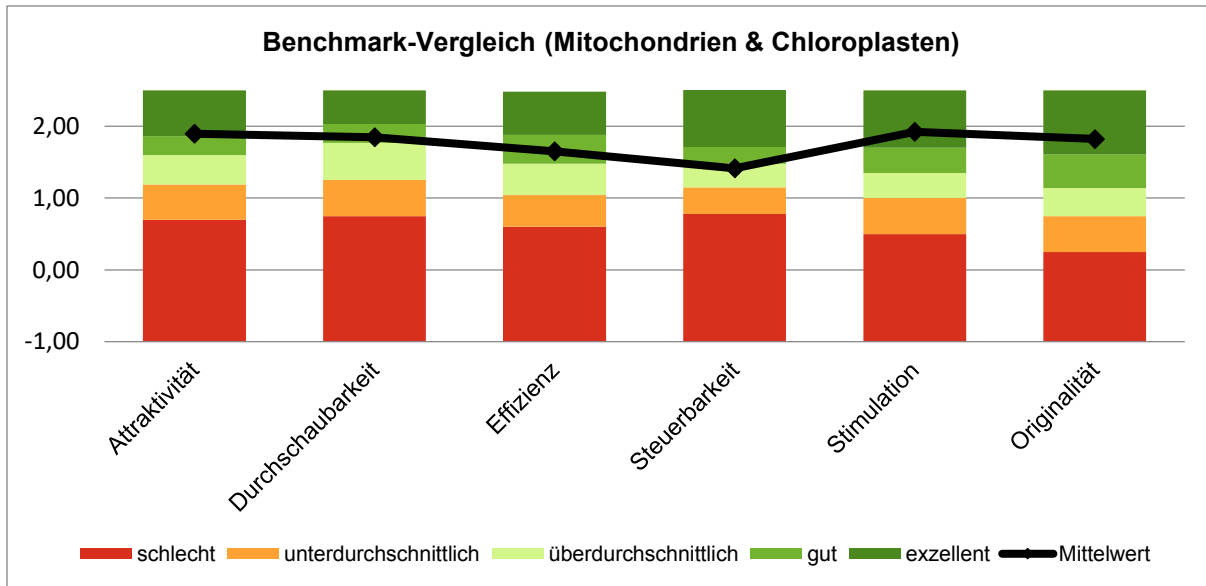


Abb. 36: Ergebnisse des Benchmark-Vergleichs (Mitochondrien und Chloroplasten). Referenzdaten: Schrepp, 2018a.

Damit liegt die App in den Dimensionen Attraktivität, Stimulation und Originalität im Ergebnisbereich der besten 10 %, in den Dimensionen Durchschaubarkeit und Effizienz schneiden 10 % der digitalen Anwendungen besser und 75 % schlechter ab. In der Dimension Steuerbarkeit sind 25 % der digitalen Anwendungen besser und 50 % schlechter.

Zur Beantwortung der Fragestellung, welchen Einfluss die Steuerungsart auf die UX hat (FF3), wurden t-Tests verbundener Stichproben verwendet. Die notwendigen Annahmen und Voraussetzungen zum Einsatz parametrischer Testverfahren wurden wie in Kapitel 5.9.1 beschrieben ermittelt und berücksichtigt. Es wurden vier Fälle von extremen Ausreißern (dreifacher Interquartilsabstand) von den weiteren Berechnungen ausgeschlossen.

Die Ergebnisse der Mittelwertvergleichstests der UX nach Steuerungsart sind in Abb. 37 grafisch dargestellt. Für die Gesamt-App-Bewertung konnten statistisch signifikante Unterschiede zwischen AR-Steuerung und Touch-Gestensteuerung in den Nutzungserlebnis-Dimensionen Attraktivität ($t(106) = 2.09, p = .039, d = .41$) und Stimulation ($t(108) = 2.74, p = .007, d = .53$) jeweils zugunsten der AR-Steuerung festgestellt werden. Diese Effekte lassen sich jedoch bei Betrachtung der Ebene einzelner LS nicht reproduzieren. Dies hatte zur Folge, dass zwecks Mittelwertvergleich der t-Test unabhängiger Stichproben genutzt werden musste, was aufgrund des Untersuchungsdesigns eine Halbierung der Stichprobe zur Folge hatte. Das Ergebnis zeigt, dass sich die AR-Steuerung besonders positiv auf die Dimensionen Attraktivität und Stimulation auswirkt, während sie gegenüber der verbreiteten Touch-Gestensteuerung in den übrigen Dimensionen keine Nachteile bringt.

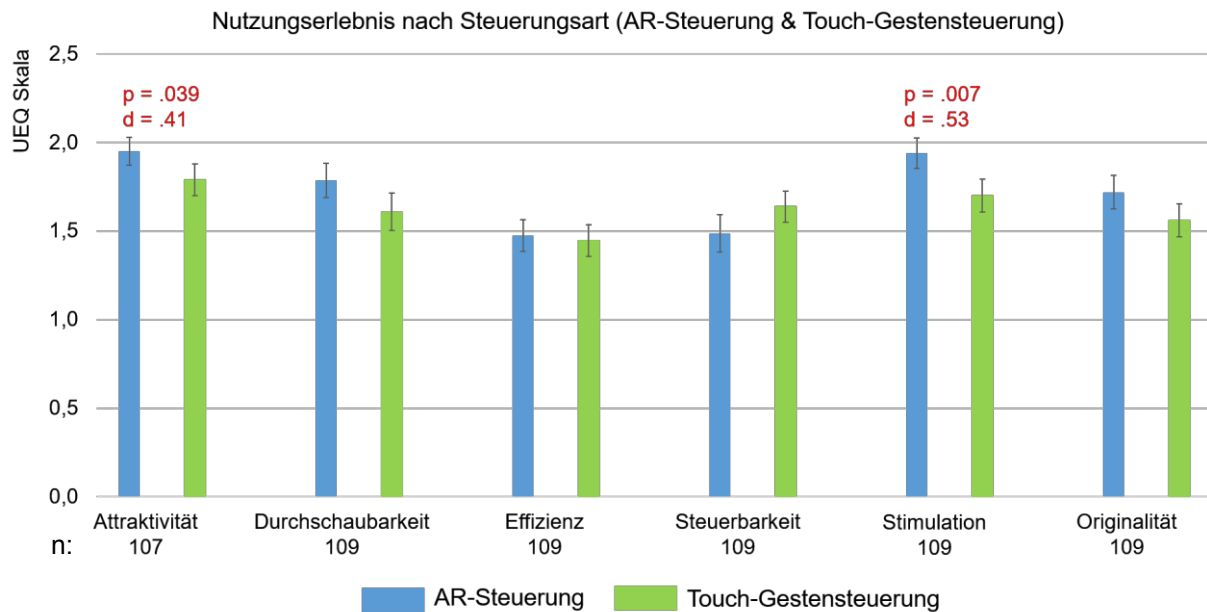


Abb. 37: Nutzungserlebnis-Dimensionen nach Steuerungsart (AR und Touch-Gestensteuerung) für die Aufbau-von-Mitochondrien-und-Chloroplasten-App. Dargestellt sind signifikante Unterschiede p , die Effektstärke Cohen's d sowie der Standardfehler r .

Aufgrund der Ähnlichkeit der dargestellten 3D-Modelle hinsichtlich des Aufbaus und der Gestaltung wurde zuvor die Annahme getroffen, dass sich die beiden LS (LS9: Chloroplast und LS10: Mitochondrium) hinsichtlich der UX nicht unterscheiden. Zur Überprüfung dieser Annahme wurden t-Tests verbundener Stichproben herangezogen. Es konnten statistisch signifikante Unterschiede zwischen beiden LS (und damit zwischen den unterschiedlichen 3D-Modellen) in den UEQ-Dimensionen Attraktivität ($t(106) = -2.39$, $p = .019$, $d = .46$), Effizienz ($t(108) = -2.31$, $p = .023$, $d = .44$) Stimulation ($t(108) = -4.67$, $p < .001$, $d = .90$) und Originalität ($t(108) = -3.49$, $p < .001$, $d = .67$), jeweils zugunsten von LS10 (Mitochondrium), festgestellt werden. Die Ergebnisse der Mittelwertvergleichstests der UX nach LS sind in Abb. 38 grafisch dargestellt.

Ergebnisse

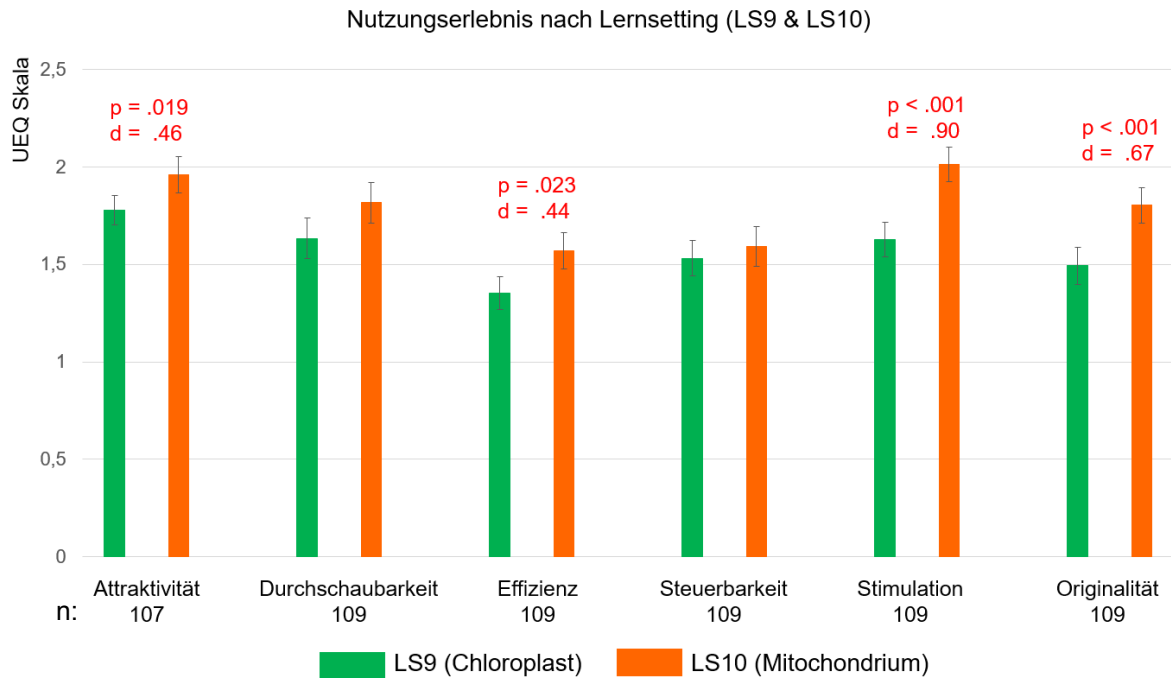


Abb. 38: User-Experience-Dimensionen nach Lernsetting (LS) (LS9 und LS10) am Beispiel der Studie zum Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten. Dargestellt sind signifikante Unterschiede p , die Effektstärke Cohen's d , der Standardfehler r sowie die Stichprobengröße n .

Das Ergebnis zeigt, dass das 3D-Modell des Mitochondriums bei den Lernenden einen besseren Gesamteindruck (Attraktivität) hinterlassen hat, sie mit weniger Interaktionsschritten das angestrebte Ziel erreichen konnten (Effizienz) und sie das Modell als neuartiger wahrgenommen haben (Originalität). Somit stellt die individuelle Gestaltung der medialen Inhalte einen zusätzlichen Faktor für die Untersuchung von AR-Apps dar.

Die weitere Aufklärung und Absicherung der in Kapitel 6.3.1 dargestellten Zusammenhänge zwischen der UX und der CLT erfolgte mittels einfaktorieller MANOVA, in der der ECL und der GCL als abhängige Variablen und die UEQ-Dimension *Stimulation* als unabhängige Variable betrachtet wurden. Da zur Durchführung einer MANOVA die unabhängige Variable nominal oder ordinal skaliert sein muss, wurde die *Stimulation* in Abhängigkeit vom Median ($Mdn = 2$) kategorisiert, sodass Werte < 2 als *geringe Stimulation* und Werte > 2 als *hohe Stimulation* angesehen wurden. Fälle, in denen der Wert dem Median entspricht, wurden in der Analyse nicht berücksichtigt, sodass die Stichprobe $n = 105$ gültige Fälle umfasste.

Weitere Voraussetzungen wurden wie folgt geprüft und berücksichtigt: Es bestand ein linearer Zusammenhang zwischen den abhängigen Variablen, der grafisch mittels Streudiagramm geprüft wurde. Weiterhin war die Korrelation $r = -.453$ zwischen dem ECL und dem GCL gering (Cut-off: $r > .90$ nach Verma (2016) bzw. $r > .80$ nach Dattalo (2013) sowie Pituch und Stevens (2016)), sodass die Analyse nicht durch Multikollinearität beeinflusst wurde. Der Levene-Test zur Prüfung auf Homokedastizität zeigte gleiche Varianzen (basierend auf dem Mittelwert) für

den ECL ($p = .076$), nicht aber für den GCL ($p = .002$) an. Da nach Ateş et al. (2019) die MANOVA als relativ robustes Testverfahren gegen Verletzung der Varianzgleichheit angesehen werden kann und die Gleichheit der Varianzen nur für den GCL galt, wurde die Analyse fortgeführt.

Die Homogenität der Varianz-Kovarianz-Matrix war mit $p = .019$ gemäß Box-Test gegeben (Cut-off $p > .001$ nach Verma (2016) und Warner (2013)). Im Datensatz befanden sich weder univariate noch multivariate Ausreißer (gemessen durch die Mahalanobis-Distanz mit $p > .001$). In drei von vier Fällen lag eine multivariate Normalverteilung vor, lediglich in den Fällen *hohe Stimulation* und *ECL* zeigte der Shapiro-Wilk-Test ein signifikantes Ergebnis an – und damit keine Normalverteilung. Da die MANOVA nach Ergebnissen von Finch (2005) als robustes statistisches Verfahren gegenüber Verletzungen der Normalverteilung angesehen werden kann, wurde die Analyse fortgeführt.

Die einfaktorielle MANOVA zeigte einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen der Stimulation für die kombinierten abhängigen Variablen (ECL und GCL) ($F(2, 97) = 17.725$, $p < .001$, partielles $\eta^2 = .268$, Wilk's $\Lambda = .732$), sodass die Stimulation einen Einfluss auf den ECL und den GCL hat. Weiterhin wurde für jede abhängige Variable als Post-hoc-Test eine einfaktorielle ANOVA durchgeführt. Es zeigte sich ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der Höhe der Stimulation für den ECL ($F(1, 98) = 11.910$, $p = .001$, partielles $\eta^2 = .108$) und für den GCL ($F(1, 98) = 34.762$, $p < .001$, partielles $\eta^2 = .262$). Damit bestätigten sich die Ergebnisse der vorangegangenen Strukturgleichungsmodellierung aus Kapitel 6.3.1, sodass die Stimulation auch in dieser Studie einen robusten Einflussfaktor für den Cognitive Load (respektive den ECL und den GCL) darstellt.

6.3.3 Art des Triggers (Forschungsfrage 4): HoloBrain

In diesem Kapitel wird der Fragestellung nach dem Einfluss der Art des Triggers (FF4 H5) auf die UX nachgegangen. Doch zunächst wird die eingesetzte HoloBrain-App durch den Benchmark-Vergleich charakterisiert.

Die Daten wurden auf inkonsistentes Antwortverhalten geprüft und die Items der einzelnen Dimensionen wurden einer Reliabilitätsanalyse unterzogen (vgl. Kapitel 5.9.3), sodass für die weiteren Analysen 25 gültige Fälle genutzt wurden. Der Benchmark-Vergleich erfolgte analog zu dem in Tab. 17 (S. 122) dargestellten Auswertungsschema, basierend auf den Daten der Gesamtbeurteilung der HoloBrain-App.

Entsprechend der Darstellung in Abb. 39 erreichte die HoloBrain-App in den Dimensionen Attraktivität, Stimulation und Originalität exzellente und in den übrigen Dimensionen Durchschnittswerte. Damit liegt sie in drei der sechs Dimensionen unter den besten 10 % der digitalen Anwendungen. In den übrigen Dimensionen schneiden 25 % der Anwendungen besser und 50 % schlechter ab.

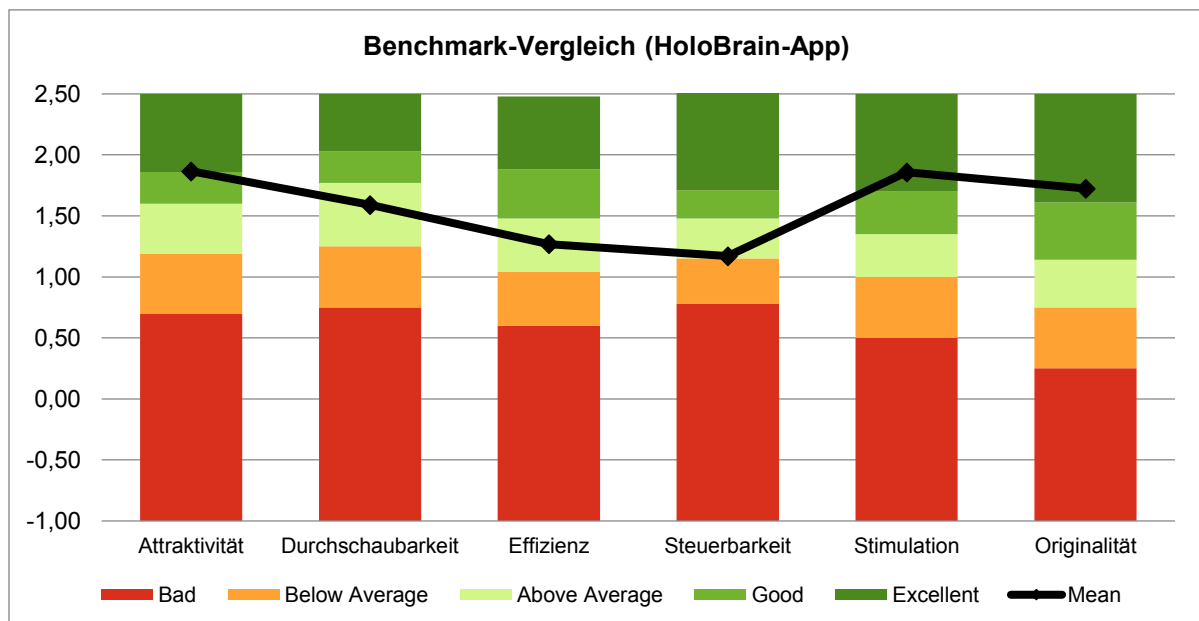


Abb. 39: Ergebnisse des Benchmark-Vergleichs (HoloBrain-App). Referenzdaten: Schrepp, 2018a.

Um eventuelle Unterschiede der UX in Abhängigkeit vom eingesetzten Trigger (FF4 H5) und von der medialen Repräsentation (FF5 H5) aufzuzeigen, wurden t-Tests unabhängiger und verbundener Stichproben durchgeführt. Die notwendigen Annahmen und Voraussetzungen zum Einsatz parametrischer Testverfahren wurden zuvor geprüft und, wie in Kapitel 5.9.1 beschrieben, ermittelt und berücksichtigt. Die Normalverteilung der Daten wurde mittels Shapiro-Wilk-Tests bestätigt. Es wurden zwei Fälle von extremen Ausreißern (dreifacher

Interquartilsabstand) von den weiteren Berechnungen ausgeschlossen. Wie in Abb. 40 dargestellt, konnte hinsichtlich der Art des Triggers kein signifikanter Unterschied zwischen dem 3D-QR-Cube und der 2D-Gehirnscheibe festgestellt werden. Es konnten in der vorliegenden Detailstudie keine Unterschiede hinsichtlich der UX nach Art des Triggers identifiziert werden.

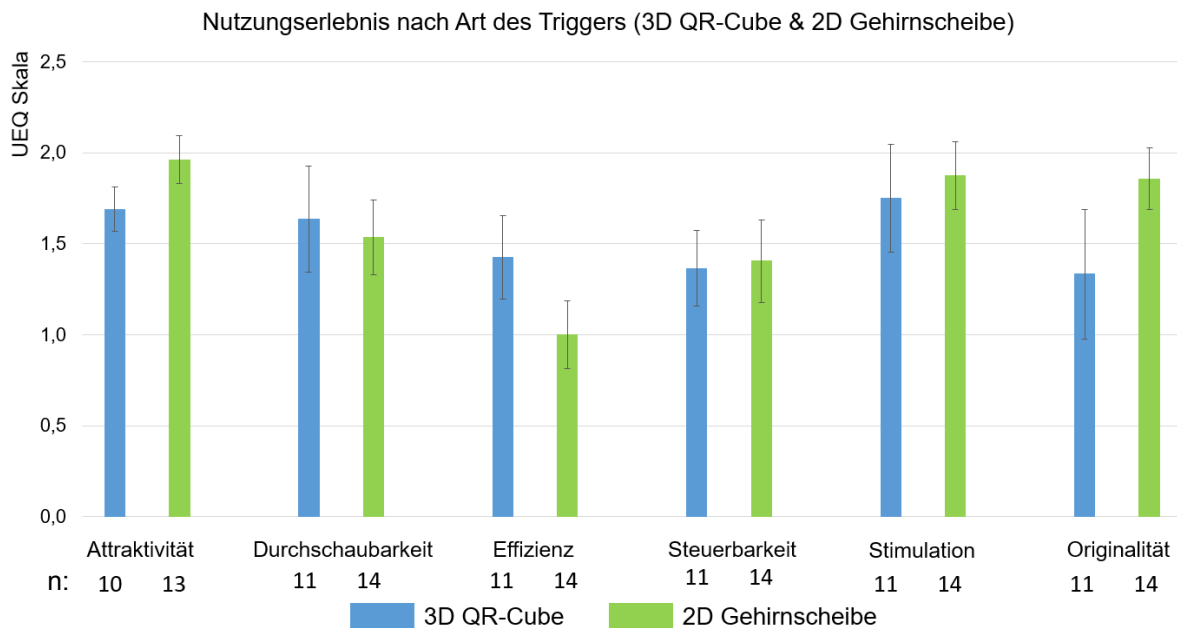


Abb. 40: User-Experience-Dimensionen nach Art des Triggers (3D-QR-Cube und 2D-Gehirnscheibe) am Beispiel der HoloBrain-Studie mit Standardfehler r.

6.3.4 Art der medialen Repräsentation (Forschungsfrage 5): HoloBrain

In diesem Kapitel wird der Fragestellung nach dem Einfluss der Art der medialen Repräsentation (FF5 H5) auf die UX nachgegangen. Zur Beantwortung dieser Frage wurden ebenfalls t-Tests verbundener Stichproben durchgeführt. Die Ergebnisse der Mittelwertanalysen (Abb. 41) zwischen dem AR-Hirnmodell und dem Papiermodell zeigen signifikante Unterschiede in den Dimensionen Attraktivität ($t(22) = 7.91, p < .001, d = 3.37$), Durchschaubarkeit ($t(24) = 2.89, p = .008, d = 1.18$), Effizienz ($t(24) = 3.25, p = .003, d = 1.33$), Stimulation ($t(24) = 5.45, p < .001, d = 2.23$) und Originalität ($t(24) = 7.03, p < .001, d = 2.87$), jeweils zugunsten des AR-Hirnmodells. Lediglich in der Dimension Steuerbarkeit war kein Unterschied feststellbar.

Ergebnisse

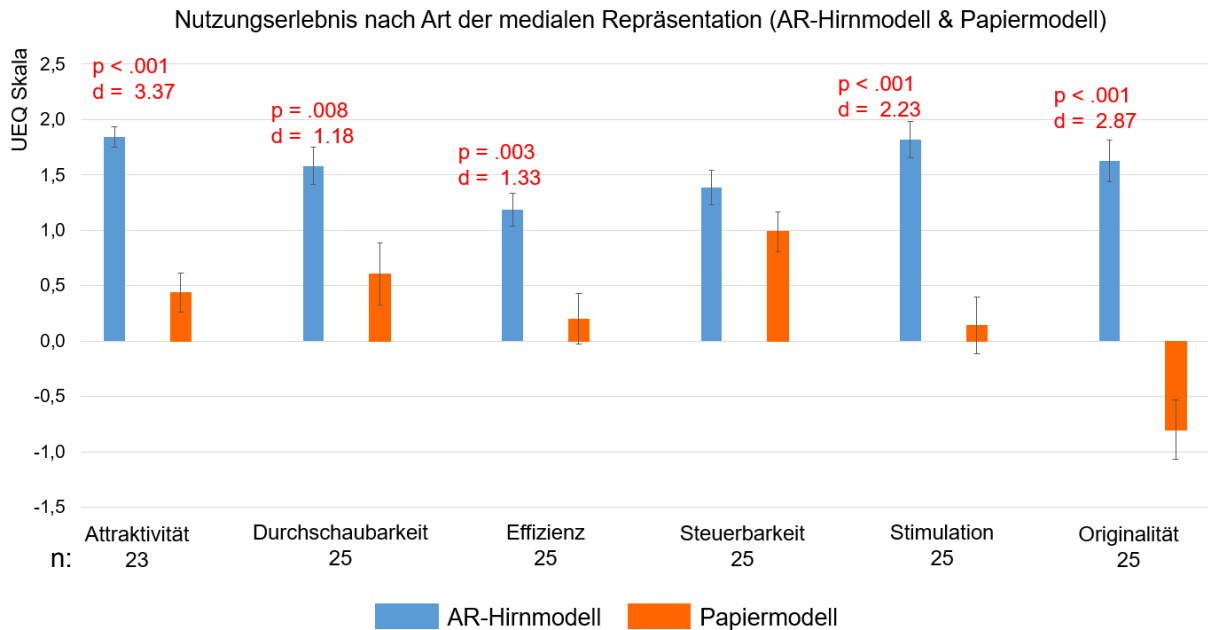


Abb. 41: User-Experience-Dimensionen nach medialer Repräsentation (AR-Hirnmodell und Papiermodell) am Beispiel der HoloBrain-Studie. Dargestellt sind signifikante Unterschiede p , die Effektstärke Cohen's d sowie der Standardfehler r .

Die Ergebnisse verdeutlichen den erheblichen Einfluss, den AR-Apps auf die UX (im Vergleich zu analogen Medien) haben können. Der Erkenntnis, dass hinsichtlich der Steuerbarkeit keine Unterschiede feststellbar waren, verdeutlicht, dass Nutzende mit AR-Apps ebenso intuitiv interagieren können wie mit realen Modellen.

6.4 Empfundene Lernunterstützung

Bei der ELU handelt es sich um eine subjektive Messgröße, die Aufschluss über die Lernwirksamkeit bestimmter Medien und das Lernen selbst (Alqurashi, 2019) gibt. Nachdem in Kapitel 2.7 die theoretischen Grundlagen dargelegt und in Kapitel 5.9.4 das Testinstrument mittels konfirmatorischer Faktorenanalyse überprüft und bestätigt wurde, folgen in den nachfolgenden Unterkapiteln die Auswertungsergebnisse der beiden Hauptstudien *Aufbau des Gehirns und Alzheimer-Demenz* sowie *Mitochondrien und Chloroplasten*.

6.4.1 Art des Mediums (FF1, FF2): Aufbau des Gehirns und Alzheimer-Demenz

Zunächst wird der in Kapitel 4.1 beschriebenen Fragestellung FF2 H7 nachgegangen, ob die Nutzung von AR zur Aufgabenbearbeitung im Vergleich zu EUM zu einer höheren ELU führt. Darüber hinaus wird mittels Strukturgleichungsmodellierung überprüft, ob sich der in Kapitel 2.7 beschriebene theoretische Zusammenhang zwischen der CLT und der ELU nachweisen lässt (FF1 H9, FF1 H10).

Die Berechnung der ELU für AR und EUM erfolgte auf Grundlage der in Kapitel 5.9.4 beschriebenen Ergebnisse der konfirmatorischen Faktorenanalyse. Um eventuelle Unterschiede der ELU in Abhängigkeit vom Medium aufzuzeigen, wurde ein t-Test verbundener Stichproben verwendet. Die notwendigen Annahmen und Voraussetzungen zum Einsatz parametrischer Testverfahren wurden wie in Kapitel 5.9.1 beschrieben ermittelt und berücksichtigt. Es fanden sich keine Ausreißer in den Daten, sodass dem t-Test eine Stichprobe von $n = 336$ zugrunde liegt. Es konnte mit $t(335) = -2.32$, $p = .021$ und $d = .25$ ein signifikanter Unterschied der ELU zwischen AR und EUM zugunsten von EUM festgestellt werden (Abb. 42). Die Ergebnisse zeigen, dass Lernende EUM eine höhere ELU zuweisen als AR, was sich jedoch nicht zwingend im objektiven LZ (vgl. Kapitel 6.1.2) widerspiegelt.

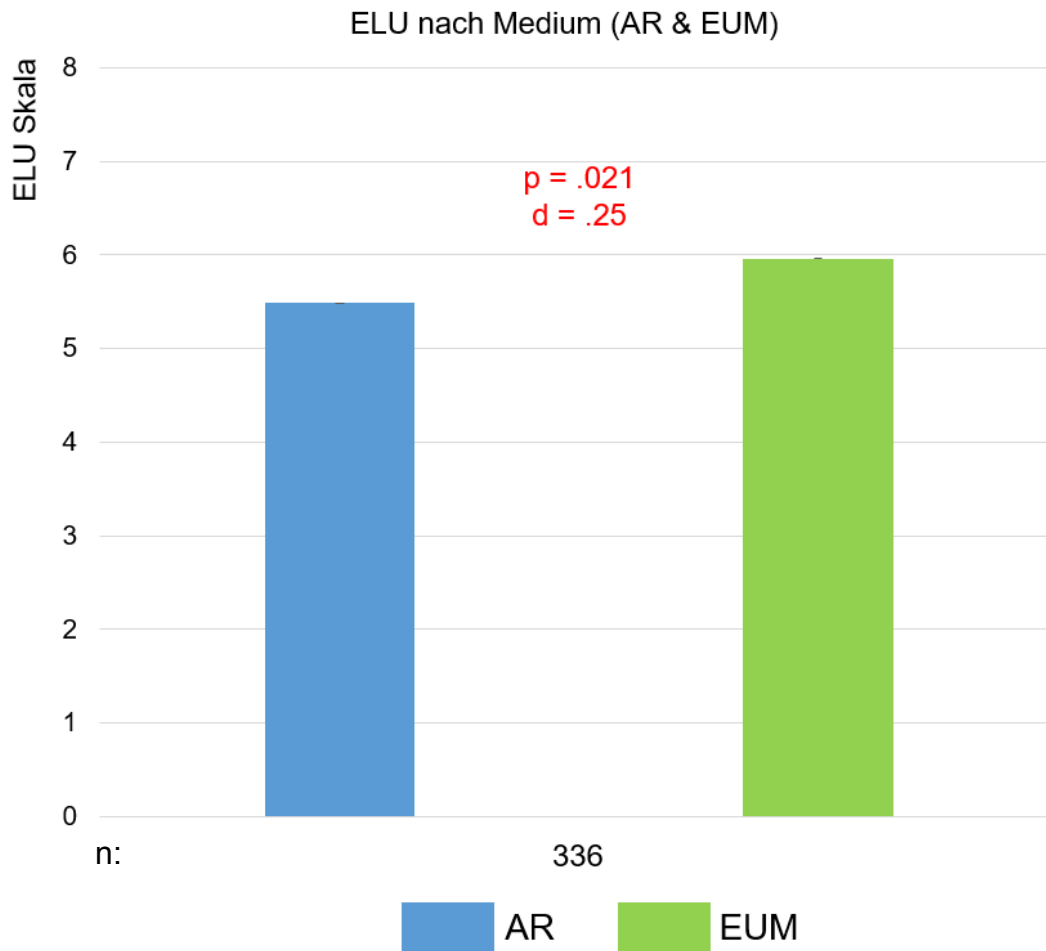


Abb. 42: Empfundene Lernunterstützung nach Medium (AR und EUM) am Beispiel des Alzheimerkoffers. Dargestellt sind signifikante Unterschiede p , die Effektstärke Cohen's d sowie der Standardfehler r .

Auf Grundlage der in Kapitel 2.7 beschriebenen theoretischen Zusammenhänge sowie der in Kapitel 5.9.2 und Kapitel 5.9.4 aufgeführten konfirmatorischen Faktorenanalysen wurden die Messmodelle der CLT und der ELU in einem Strukturgleichungsmodell zusammengeführt. Dies ermöglichte die Überprüfung sowie die qualitative und quantitative Bestimmung von Kausalzusammenhängen der latenten Variablen. Das resultierende Strukturgleichungsmodell basiert aufgrund des für die Analyse notwendigen listenweisen Fallausschlusses auf einer Stichprobe von $n = 285$. Das resultierende Strukturgleichungsmodell weist mit $p(X^2) < .001$, CFI = .981, TLI = .973, RMSEA = .065 und SRMR = .043 einen guten Model-Fit auf und ist in Abb. 43 als Pfaddiagramm mit farblich hervorgehobenen Pfaden für signifikante Zusammenhänge dargestellt. Weitere statistische Kenngrößen zu den Pfadkoeffizienten und der Kovarianz des Modells sind in Tab. 31 aufgeführt.

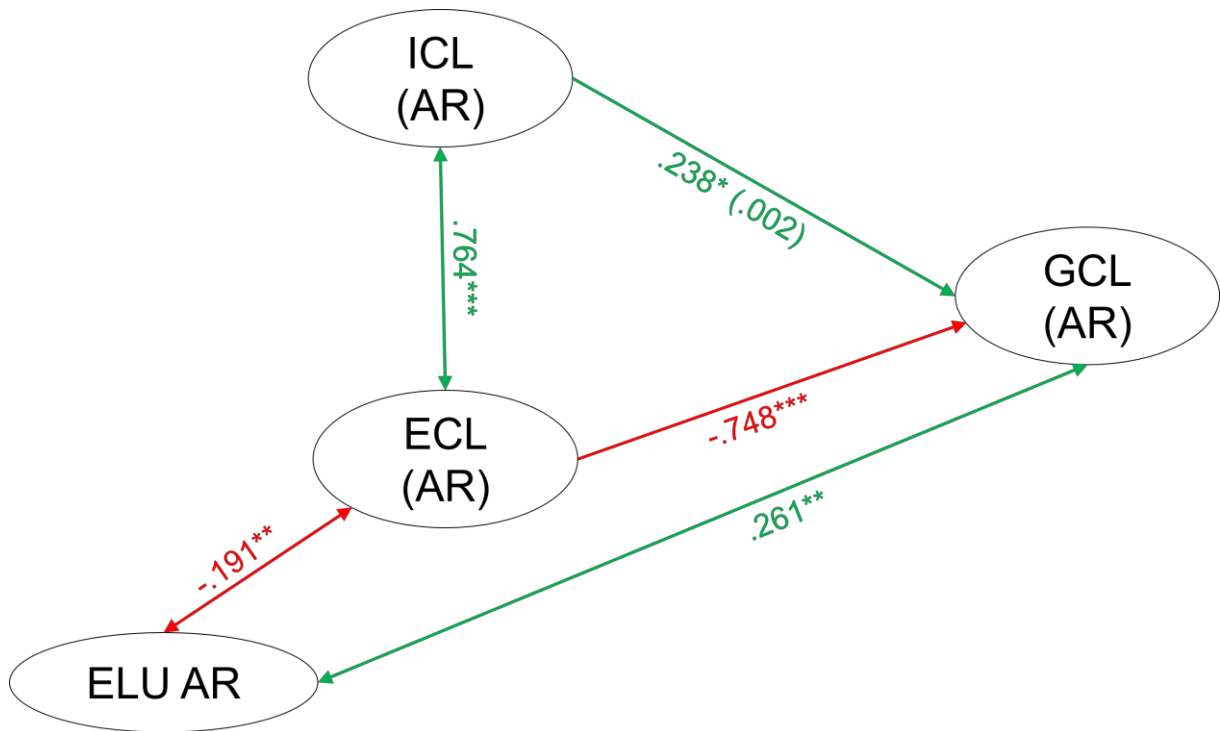


Abb. 43: Strukturgleichungsmodell (CLT und ELU) mit farblich gekennzeichneten signifikanten Pfaden (rot = negative Zusammenhänge, grün = positive Zusammenhänge). Kovarianz zwischen ICL/ECL, ECL/ELU, GCL/ELU sowie β -standardisierte Pfadkoeffizienten zwischen den übrigen Faktoren. Model-Fit: $p(X^2) < .001$, CFI = .981, TLI = .973, RMSEA = .065, SRMR = .043.

Tab. 31: Pfadkoeffizienten und Kovarianz der Strukturgleichungsmodellierung (CLT und ELU) mit $n = 285$. Nicht standardisierte Schätzung b ; Standardfehler r ; Standardabweichung vom Mittelwert z , Signifikanz p , standardisierte Schätzung β ; Kovarianzmatrix*.

Zielkonstrukt	Prädiktor	b	r	z	p	β
GCL	ICL	.332	.107	3.096	.002	.238
GCL	ECL	-1.032	.108	-9.577	< .001	-.748
ICL*	ECL*	1.261	.212	5.939	< .001	.764
ECL*	ELU*	-.627	.156	-4.019	< .001	-.191
GCL*	ELU*	.956	.231	4.138	< .001	.261

In diesem Strukturgleichungsmodell bleiben die in Kapitel 6.2.1 beschriebenen Wirk- und Kausalzusammenhänge über die signifikanten Pfadkoeffizienten und Kovarianzen der CLT bestehen. Darüber hinaus zeigen sich innerhalb der Kovarianzmatrix ein moderat negativer Zusammenhang zwischen der ELU und dem ECL sowie ein moderat positiver Zusammenhang zwischen der ELU und dem GCL. Damit stellte sich die ELU als ein weiterer nicht gerichteter Einflussfaktor auf den CL heraus, der theoriekonform mit dem ECL und dem GCL in einem gegenseitigen Verhältnis steht.

6.4.2 Art der Steuerung (Forschungsfrage 3): Mitochondrien und Chloroplasten

In diesem Kapitel wird zunächst der Frage nachgegangen, ob die Nutzung der AR-Steuerung zur Aufgabenbearbeitung im Vergleich zur Touch-Gestensteuerung zu einer höheren ELU führt (FF3 H7). Ähnlich wie im vorangegangenen 6.4.1 sollen Wirkzusammenhänge zwischen der ELU und der CLT aufgezeigt werden (FF1 H9, FF1 H10). Aufgrund der geringeren Stichprobengröße wurde allerdings auf eine Strukturgleichungsmodellierung verzichtet und die in Kapitel 6.4.1 beschriebenen Zusammenhänge wurden mittels Pearson-Produkt-Moment-Korrelation nachgewiesen.

Die Berechnung der ELU für die AR-Steuerung und die Touch-Gestensteuerung erfolgte auf Grundlage der in Kapitel 5.9.4 beschriebenen Ergebnisse der konfirmatorischen Faktorenanalyse. Um eventuelle Unterschiede der ELU in Abhängigkeit von der Steuerungsart aufzuzeigen, wurde ein t-Test verbundener Stichproben verwendet. Die notwendigen Annahmen und Voraussetzungen zum Einsatz parametrischer Testverfahren wurden wie in Kapitel 5.9.1 beschrieben ermittelt und berücksichtigt. Es fanden sich keine Fälle von extremen Ausreißern, sodass den weiteren Analysen $n = 123$ gültige Fälle zugrunde lagen. Der t-Test verbundener Stichproben zeigte mit $t(122) = 5.68$, $p < .001$ und $d = 1.03$ einen signifikanten Unterschied zugunsten der AR-Steuerung (Abb. 44).

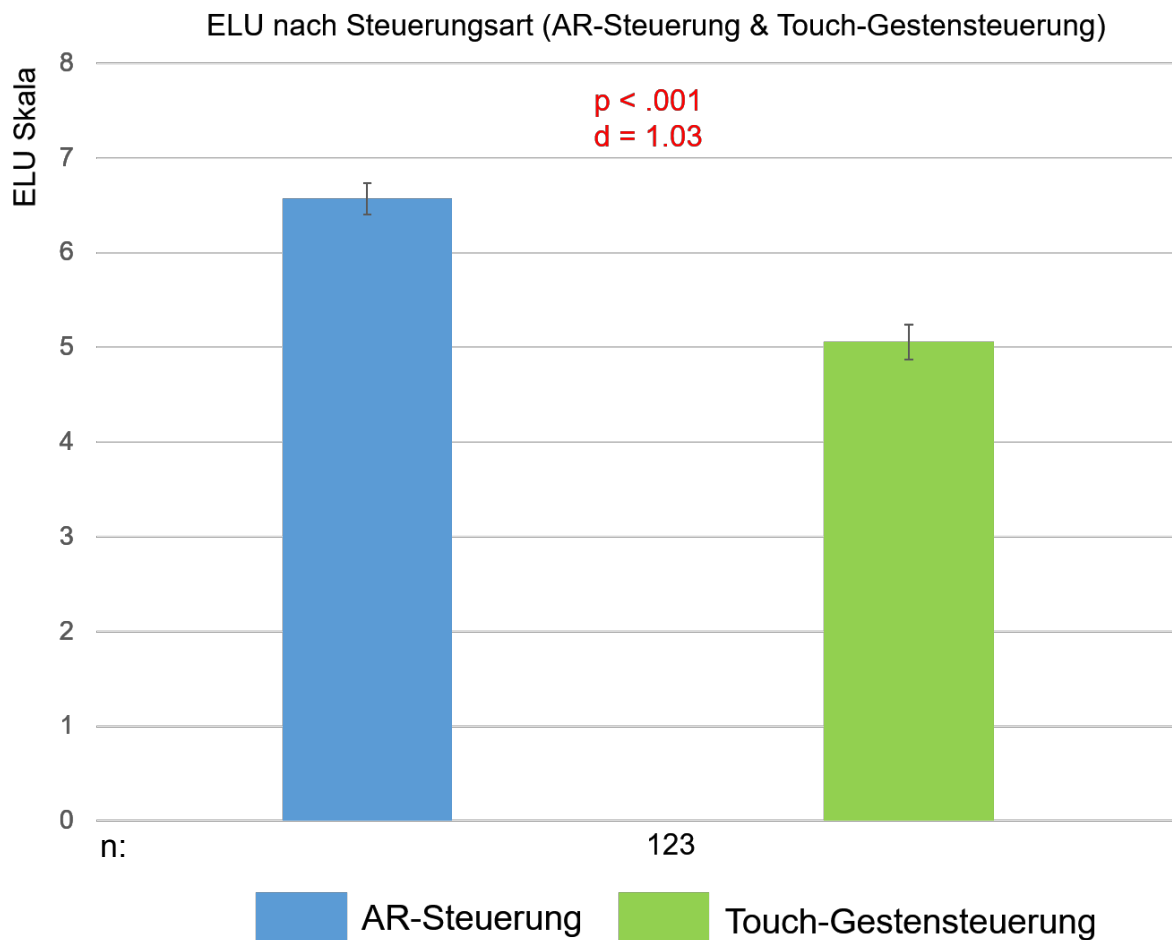


Abb. 44: Empfundene Lernunterstützung nach Steuerungsart (AR-Steuerung und Touch-Gestensteuerung) am Beispiel der *Mitochondrien-und-Chloroplasten-Studie*. Dargestellt sind signifikante Unterschiede p , die Effektstärke Cohens's d sowie der Standardfehler r .

Das Ergebnis zeigt, dass die ELU der AR-Steuerung von den Lernenden besser als die der Touch-Gestensteuerung bewertet wird. Dies spiegelt sich jedoch nicht zwingend in dem objektiv erfassbaren LZ (vgl. Kapitel 6.1.2) wider, sondern stellt die subjektive Einschätzung der Lernenden dar.

Vor der Testung des Zusammenhangs zwischen der ELU, dem ECL und dem GCL über die Pearson-Produkt-Moment-Korrelation wurden die notwendigen Voraussetzungen geprüft. Demnach stehen die Variablen in einem linearen Zusammenhang und beinhalten keine extremen Ausreißer. Es konnte nach Cohen (1988) mit $r = -.221$ und $p = .015$ ein geringer negativer Zusammenhang zwischen der ELU und dem ECL festgestellt werden. Die ELU und der GCL korrelieren hingegen mit $r = .419$ und $p < .001$ moderat miteinander. Die Ergebnisse sind tabellarisch in der Korrelationsmatrix dargestellt (Tab. 32).

Tab. 32: Korrelationsmatrix ELU AR mit ECL und GCL.

	ELU AR	ECL AR	GCL AR
ELU AR			
ECL AR	-.221*		
GCL AR	.419**	-.410**	

* $0,01 \leq p < 0,05$: signifikant

** $0,001 \leq p < 0,01$: hoch signifikant

*** $p < 0,001$: höchst signifikant

Das Ergebnis zeigt eine ähnliche gegenseitige Abhängigkeit der Variablen ELU AR mit ECL AR wie bei den im Rahmen der Strukturgleichungsmodellierung (vgl. Kapitel 6.4.1) festgestellten Kovarianzen. Ebenso zeigt sich ein positiv nicht gerichteter Zusammenhang zwischen der ELU AR mit dem GCL AR, der im Vergleich zum Strukturgleichungsmodell höher ausfällt, sich aber als robust über verschiedene Studien erweist.

6.5 Immersion

Bei der Immersion handelt es sich um eine subjektive, mehrstufige Messgröße, die mittels Fragebögen erfasst werden kann. Während hierzu in Kapitel 2.6 die theoretischen Grundlagen dargelegt wurden und in Kapitel 5.9.5 der ARI-Fragebogen, mit dem die Immersion auf den Ebenen Engagement, Inanspruchnahme und totale Immersion erfasst wird, als Testinstrument umfassend charakterisiert wurde, fokussiert sich das vorliegende Kapitel auf die Auswertungsergebnisse der HoloBrain-Detailstudie.

6.5.1 Art des Triggers (Forschungsfrage 4): HoloBrain

In diesem Kapitel wird zunächst der Frage nachgegangen, welchen Einfluss die Art des Triggers (FF4 H6) auf die Immersion hat. Anschließend wird mittels multipler linearer Regression der in Kapitel 2.6 beschriebene Zusammenhang zwischen der Immersion und dem LZ untersucht (FF1 H11).

Zur Beantwortung der Fragestellung, ob die Art des Triggers einen Einfluss auf die Immersion hat, wurde ein t-Test unabhängiger Stichproben verwendet. Die notwendigen Voraussetzungen und Annahmen zur Durchführung der parametrischen Mittelwertvergleiche wurden wie in Kapitel 5.9.1 beschrieben ermittelt und berücksichtigt. Zwar fanden sich innerhalb der untersuchten Gruppen keine extremen Ausreißer, jedoch lag gemäß Shapiro-Wilk-Test in zwei Gruppen keine Normalverteilung vor (siehe Anhang 3.1.12, S. A183).

Es hätten aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes nach Bortz und Schuster (2016), Kähler (2004) sowie Tavakoli (2013) parametrische Testverfahren angewendet werden können, aufgrund der Stichprobengröße von $n = 31$ (3D-QR-Cube) bzw. $n = 30$ (2D-Gehirnscheibe), wurde aber entschieden, zwecks Absicherung zusätzlich den Mann-Whitney-U-Test zu berechnen. Sowohl der t-Test als auch der Mann-Whitney-U-Test zeigten in der Dimension Engagement ($t(59) = -.018$, $p = .986$ bzw. $U = 451.500$, $Z = -.196$, $p = .845$, $\eta^2 < .001$) keine signifikanten Unterschiede zwischen dem QR-Cube ($Mdn = 4.125$) und der Gehirnscheibe ($Mdn = 4.125$). Ein ähnliches Bild ergab sich zwischen dem QR-Cube ($Mdn = 3.2$) und der Gehirnscheibe ($Mdn = 3.4$) in der Dimension Inanspruchnahme mit $t(59) = -1.882$ und $p = .065$ bzw. $U = 348.500$, $Z = -1.706$, $p = .088$ und $\eta^2 = .048$. In der Dimension totale Immersion zeigten sich sowohl im t-Test ($t(59) = -2.117$, $p = .039$, $d = .55$) als auch im Mann-Whitney-U-Test ($U = 319.500$, $Z = -2.116$, $p = .034$) signifikante Unterschiede zwischen dem QR-Cube ($Mdn = 3.429$) und der Gehirnscheibe ($Mdn = 3.714$) mit einem starken Effekt $\eta^2 = .329$. Die Ergebnisse sind grafisch in Abb. 45 dargestellt. Das Ergebnis zeigt, dass Lernende mithilfe der 2D-Gehirnscheibe leichter die Ebene der totalen Immersion erreichen als mit dem 3D-QR-Cube, sodass sich eher ein Gefühl der Interaktion mit einem realen Modell einstellt und diese Interaktion die volle Aufmerksamkeit der Lernenden bindet.

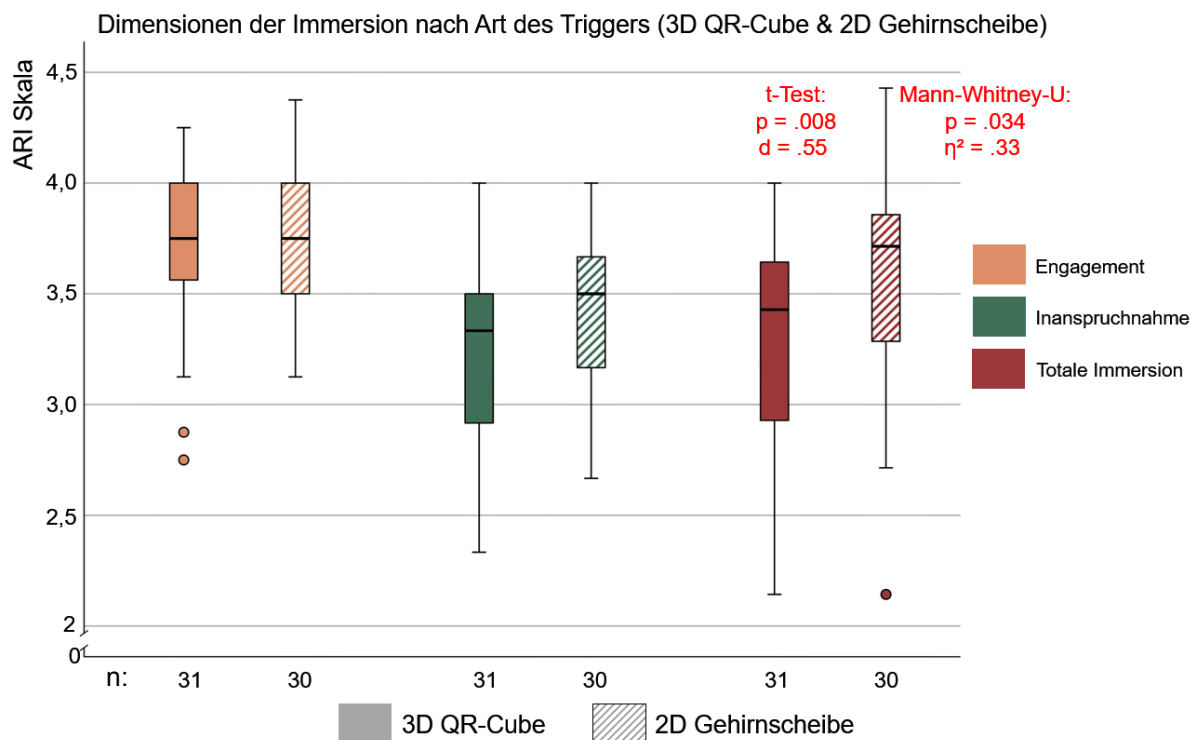


Abb. 45: Dimensionen der Immersion nach Art des Triggers (3D-QR-Cube und 2D-Gehirnscheibe) für die HoloBrain-Studie. Boxplot-Diagramm mit Median, Quartile, Ausreißer, signifikante Unterschiede p , Effektstärke Cohen's d , Determinationskoeffizient η^2 sowie Stichprobengröße n .

Neben den bisherigen Mittelwertvergleichen wurde eine multiple lineare Regression durchgeführt, um die Frage nach einem Zusammenhang zwischen den einzelnen Dimensionen der Immersion und dem LZ zu untersuchen. Nach Prüfung der Voraussetzungen beinhalteten die Daten zwar keine Ausreißer, die außerhalb von drei Standardabweichungen lagen, jedoch befanden sich in 12 Fällen die Hebelwerte außerhalb des Cut-offs von $> .098$ (berechnet nach Igo, 2010), sodass diese von der weiteren Analyse ausgeschlossen wurden. Laut Durbin-Watson-Statistik (2.35) ist eine Autokorrelation der Residuen nicht vollkommen auszuschließen. Das Modell weist eine geringe Anpassungsgüte von $R^2 = .133$ (korrigiertes $R^2 = .076$) auf. Mit $F(3, 45) = 2.31$ und $p = .089$, sagen die Dimensionen der Immersion (Prädiktoren) nicht signifikant den LZ voraus. Es konnte zudem kein linearer Zusammenhang identifiziert werden.

6.5.2 Art der medialen Repräsentation (Forschungsfrage 5): HoloBrain

Um die Frage zu beantworten, ob die mediale Repräsentation (FF5 H1) und dadurch das AR-Hirnmodell zu einem höheren Erleben der Immersion führt als das Papiermodell, wurden für die einzelnen Dimensionen der Immersion t-Tests verbundener Stichproben durchgeführt. Die Voraussetzungen und Annahmen zur Durchführung der parametrischen Mittelwertvergleiche

wurden wie in Kapitel 5.9.1 beschrieben ermittelt und berücksichtigt. In dem Datensatz befanden sich keine Ausreißer und eine Normalverteilung lag in allen Paarungen vor, sodass der t-Test als parametrisches Testverfahren berechnet werden konnte. Die Ergebnisse sind in Abb. 46 grafisch dargestellt. In den drei Dimensionen Engagement ($t(60) = 11.665, p < .001, d = 3.01$), Inanspruchnahme ($t(60) = 5.192, p < .001, d = 1.34$) und totale Immersion ($t(60) = 11.587, p < .001, d = 2.99$) konnten signifikante Unterschiede zugunsten des AR-Hirnmodells beobachtet werden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass es den Lernenden mit dem AR-Hirnmodell auf allen drei Ebenen leichter fiel, eine immersive Erfahrung zu erleben, sodass sie die Art der Arbeit als etwas Neues empfanden und diese ihnen leichtfiel, sie aber auch durch das AR-Hirnmodell emotional angeregt und fokussiert wurden. Es hat sich ein realer Eindruck eingestellt, sodass die Lernenden voll in die Arbeit eintauchen konnten.

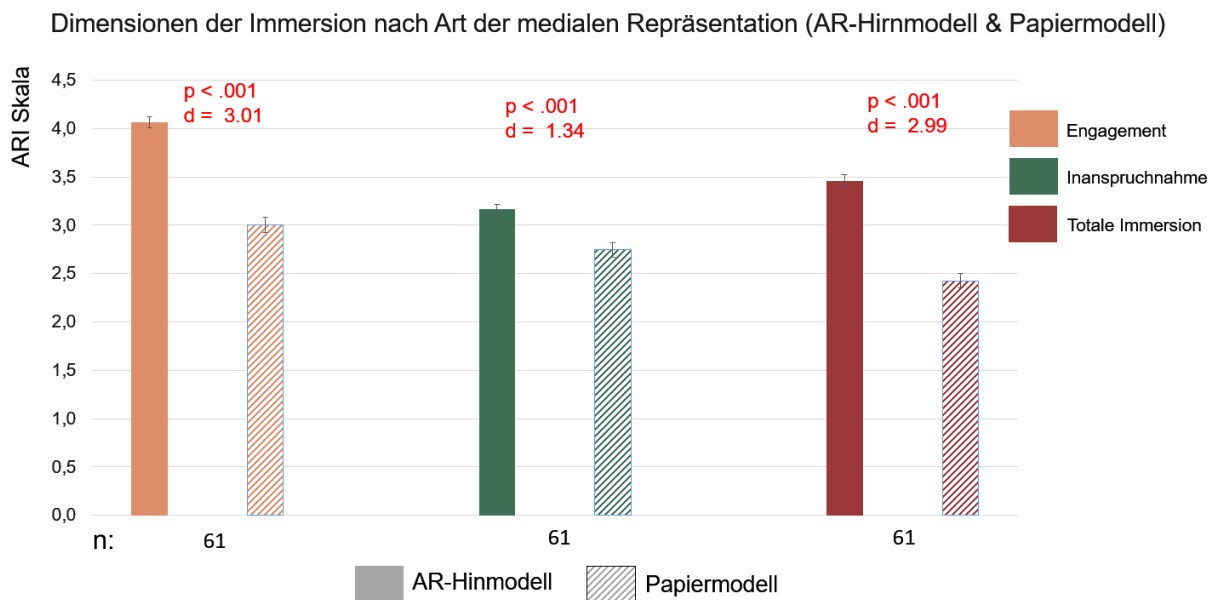


Abb. 46: Immersion nach medialer Repräsentation (AR-Hirnmodell und Papiermodell) am Beispiel der HoloBrain-Studie. Dargestellt sind signifikante Unterschiede p , die Effektstärke Cohen's d sowie der Standardfehler r .

6.6 Ergebniszusammenführung

Tab. 33: Ergebnisübersicht der einzelnen Studien.

	Alzheimerkoffer			Mitochondrien und Chloroplasten	HoloBrain												
Lernzuwachs	Höherer LZ mit AR in: <ul style="list-style-type: none"> • beiden UE • UE <i>Aufbau des menschlichen Gehirns</i> • LS1 • LS5 Höherer LZ mit EUM in: <ul style="list-style-type: none"> • LS8 Verweis: S. 140			Kein Unterschied im LZ in: <ul style="list-style-type: none"> • gesamten UE Verweis: S. 141	Art des Triggers: <ul style="list-style-type: none"> • kein Unterschied Verweis: S. 144												
				höherer LZ mit Touch-Gestensteuerung in: <ul style="list-style-type: none"> • LS9 Verweis: S. 142	Art der medialen Repräsentation: <ul style="list-style-type: none"> • keine Daten aufgrund des Untersuchungsdesigns 												
Cognitive Load	Load	AR höher	EUM höher	Keine Unterschiede feststellbar Verweis: S. 149	Art des Triggers:												
Mittelwertvergleich	CL	LS5, LS7	LS6, LS8		<ul style="list-style-type: none"> • höherer ICL bei Gehirnscheibe Verweis: S. 152												
	ICL	LS5	LS6, LS8														
	ECL	LS5	-														
	GCL	UE Path. AD	-														
	Verweis: S. 146				<table border="1"> <thead> <tr> <th>Load</th> <th>AR höher</th> <th>EUM höher</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ICL</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>ECL</td> <td></td> <td>Papiermodell</td> </tr> <tr> <td>GCL</td> <td>3D-Gehirn</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> Verweis: S. 153	Load	AR höher	EUM höher	ICL	-	-	ECL		Papiermodell	GCL	3D-Gehirn	
Load	AR höher	EUM höher															
ICL	-	-															
ECL		Papiermodell															
GCL	3D-Gehirn																

Ergebnisse

Fortsetzung Tab. 33

<p>Cognitive Load Zusammenhang mit LZ</p>	<p>Methode: SEM Ergebnis: guter Model-Fit Details: <ul style="list-style-type: none"> • GCL Prädiktor für LZ • ICL und ECL Prädiktoren für GCL, aber nicht für LZ • ICL und ECL: hohe Kovarianz <i>Verweis: S. 147</i></p>	<p>Methode: MLR Modell: signifikante Prädiktion möglich (ICL, ECL -> GCL) Details: ICL kein Regressor für GCL ECL ist Regressor für GCL Methode: einfache lineare Regression Modell: signifikante Prädiktion möglich (ECL -> GCL) Details: ECL ist Regressor für GCL Methode: MLR Modell: nicht signifikant (ICL, ECL, GCL -> LZ) Details: - <i>Verweis: S. 149</i></p>	<p>-</p>
<p>Nutzungserlebnis Benchmark der AR-Apps</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Überdurchschnittliche bis exzellente Ergebnisse • Steuerbarkeit unterdurchschnittlich <i>Verweis: S. 155</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe bis exzellente Ergebnisse • Steuerbarkeit überdurchschnittlich <i>Verweis: S. 158</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Überdurchschnittliche bis exzellente Ergebnisse in allen Dimensionen • Steuerbarkeit niedrigste Bewertung <i>Verweis: S. 162</i>

Ergebnisse

Fortsetzung Tab. 33

Nutzungserlebnis	-	<p>Bessere UX nach Art der Steuerung in:</p> <ul style="list-style-type: none"> • AR-Steuerung (Attraktivität, Stimulation) <p>Verweis: S. 159</p>	<p>Art des Triggers: keine Unterschiede Verweis: S. 163</p>
<i>Mittelwertvergleich</i>	<p>Anmerkung: Aufgrund des Untersuchungsdesigns wurde nur die App als Ganzes evaluiert, einzelne LS wurden demnach nicht betrachtet.</p>	<p>Bessere UX nach LS (9 und 10):</p> <ul style="list-style-type: none"> • LS10 in allen Dimensionen höher (Ausnahme: Steuerbarkeit) <p>Verweis: S. 160</p>	<p>Art der medialen Repräsentation: AR in allen Dimensionen höher (Ausnahme: Steuerbarkeit) Verweis: S. 164</p>
Nutzungserlebnis	Methode: SEM	Methode: MANOVA	-
<i>Zusammenhang mit CLT</i>	<p>Ergebnis: guter Model-Fit</p> <p>Details:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stimulation Prädiktor für ECL und GCL • Effizienz und Stimulation kovariieren (+) <p>Verweis: S. 156</p>	<p>Ergebnis: signifikant</p> <p>Details:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bestätigung der SEM (Zusammenhang zwischen Stimulation (kategorisiert) und ECL/GCL) <p>Verweis: S. 160</p>	
Empfundene	Höhere ELU mit EUM	Höhere ELU mit AR	-
<i>Lernunterstützung Mittelwertvergleich</i>	Verweis: S. 166	Verweis: S. 169	

Ergebnisse

Fortsetzung Tab. 33

Empfundene Lernunterstützung Zusammenhang mit CLT	<p>Methode: SEM</p> <p>Ergebnis: guter Model-Fit</p> <p>Details:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ELU kovariiert mit ECL (-) und GCL (+) <p>Verweis: S. 167</p>	<p>Methode: Pearson-Produkt-Korrelation</p> <p>Ergebnis: signifikant</p> <p>Details:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ELU korreliert mit ECL (-) und GCL (+) <p>Verweis: S. 170</p>	-
Immersion	-	-	<p>Art des Triggers:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gehirnscheibe höhere Werte bei <i>Totale Immersion</i> <p>Verweis: S. 172</p> <p>Art der medialen Repräsentation:</p> <ul style="list-style-type: none"> • AR in allen Dimensionen signifikant höher <p>Verweis: S. 173</p>

7 Diskussion

Ziel dieser Arbeit ist es, den Effekt AR-typischer Einflussfaktoren (vgl. Abb. 2, S. 9) auf die Lernwirksamkeit in authentischen AR-Lernumgebungen zu untersuchen. Um differenzierte Einblicke in die Potenziale von AR-basierten Lernumgebungen für den unterrichtlichen Einsatz geben zu können, wurde eine mehrdimensionale Betrachtung mittels objektiver und subjektiver Testinstrumente durchgeführt. Dementsprechend wurde in einer breit angelegten Studie dem Fragekomplex nachgegangen, welchen Einfluss die Art des Mediums (AR oder EUM) auf die Lernwirksamkeit (FF2) hat, und es wurde untersucht, ob Unterschiede hinsichtlich des LZ, des CL, der UX und der ELU auftreten.

Aufgrund der vielfältigen Eigenschaften und Gestaltungsmöglichkeiten von AR-Lernumgebungen wurde in den Folgestudien der Fokus auf die Art der Steuerung (AR- oder Touch-Gestensteuerung) (FF3), die Art des Triggers (2D-Gehirnscheibe oder 3D-QR-Cube) (FF4) sowie die Art der medialen Repräsentation (AR-Hirnmodell oder Papiermodell) (FF5) gelegt, um eine mehrdimensionale Betrachtung AR-typischer Merkmale zu ermöglichen. Darüber hinaus wurden die UX sowie die Immersion in den Mittelpunkt der Untersuchungen gestellt. Weitere Ziele der Analysen waren die Überprüfung und Validierung der eingesetzten Testinstrumente sowie die statistische Prüfung theoretisch abzuleitender Zusammenhänge zwischen den Testinstrumenten (FF1), was mit statistischen Methoden wie der Strukturgleichungsmodellierung erfolgte.

Im Folgenden werden die in Kapitel 6 aufgeführten Einzelergebnisse diskutiert, indem diese mit den zugrunde liegenden Theorien und Modellen sowie miteinander in Bezug gesetzt werden und, sofern möglich, mit Resultaten vergleichbarer Studien abgeglichen werden.

7.1 Lernzuwachs

Der LZ kann als die zentrale und übergeordnete praxisrelevante Messgröße der einzelnen Studien gesehen werden, da diese im Gegensatz zu anderen Messgrößen dieser Arbeit nicht als Selbsteinschätzung erhoben wurde. Sie errechnet sich nach Hake (1998) aus der Differenz des Lernerfolgs (Erhebung nach Bearbeitung der Aufgabenstellungen) und des Vorwissens (Erhebung zu Beginn der Studie) und spiegelt damit nicht den aktuellen Stand des (biologischen) Fakten- und Konzeptwissens in einer bestimmten Domäne und zu einem definierten Zeitpunkt wider, sondern bildet den Ertrag des tatsächlichen Lernprozesses ab. Während der Bestimmung des Vorwissens und des Lernerfolgs sachliche Bezugsnormen zugrunde liegen, würde sich der LZ im Fall einer Bewertung auf die individuelle Bezugsnorm stützen und so die Leistungsentwicklung wiedergeben.

Durch die Berücksichtigung des Vorwissens entstehen jedoch Abhängigkeiten, die bei der Bewertung des LZ berücksichtigt werden müssen: Zum einen wird der potenziell mögliche LZ durch das Vorwissen eingeschränkt, sodass Neulinge deutlich höhere LZ erreichen können als Lernende mit großem Vorwissen. Zum anderen können Lernende mit großem Vorwissen, aufgrund bestehender kognitiver Schemata, auf dieses im Lernprozess zurückgreifen, sodass es ihnen leichter fällt, neue Informationen in ihre Schemata zu integrieren.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse des LZ kurz rekapituliert und mögliche Ursachen für identifizierte Effekte werden erörtert sowie mit Ergebnissen vergleichbarer Studien in Beziehung gesetzt. Eine detaillierte Beurteilung der Ergebnisse findet sich in Kapitel 7.2.2. Dort werden, auf Grundlage der identifizierten Ergebnisse und der spezifischen Charakterisierung der einzelnen LS, die Ergebnisse des LZ und die Erfassung des CL miteinander verknüpft.

7.1.1 Art des Mediums (Forschungsfrage 2): Aufbau des Gehirns und Pathologie der Alzheimer-Demenz

Im direkten Vergleich des LZ in Abhängigkeit vom eingesetzten Medium (AR oder EUM) zeigten sich signifikante Unterschiede in vier von sieben LS (vgl. S. 140). Der LZ lag in drei der besagten vier Fälle bei AR höher als bei EUM. Diese Unterschiede zugunsten von AR zeigten sich ebenso im Mittel aller LS wie auch in der Unterrichtseinheit *Aufbau des menschlichen Gehirns*, nicht jedoch für die Einheit *Pathologie der Alzheimer-Demenz*. Somit kann, besonders vor dem Hintergrund der mehrfach unabhängig evaluierten Kontrollgruppe (EUM), AR als gleichwertiges und in einzelnen Fällen als ein geeigneteres Medium für den Biologieunterricht sowie für die Vermittlung von Lerninhalten angesehen werden. Diese Ergebnisse decken sich mit der differenzierten Studienlage, bei der ebenfalls mehrheitlich positive Einflüsse auf den LZ bzw. die Lernleistung (Altmeyer et al., 2020; K.-H. Cheng, 2015; Lai et al., 2019; Turan et al., 2018), aber in einigen Fällen auch keine Einflüsse auf den LZ (Cai et al., 2013; Juan et al., 2016; Thees et al., 2020) festgestellt wurden.

7.1.2 Art der Steuerung (Forschungsfrage 3): Mitochondrien und Chloroplasten

In Bezug auf den Einfluss der Art der Steuerung (AR-Steuerung oder Touch-Gestensteuerung) auf den LZ in zwei untersuchten LS konnten signifikante Unterschiede in LS9 zugunsten der Touch-Gestensteuerung identifiziert werden (vgl. S. 142). Dieser Effekt zeigte sich hingegen nicht in LS10. Mögliche Erklärungen hierzu lassen sich in der studienpraktischen Durchführung sowie in der möglichen Ablenkung der Lernenden durch die Technologie finden. Die Lernenden erhielten den Arbeitsauftrag, mithilfe der App und der dort dargestellten

Informationen einen Lückentext auf einem Arbeitsblatt (Anhang 1.2.2, S. A95) zum Aufbau von Chloroplasten (LS9) und Mitochondrien (LS10) zu vervollständigen, sodass das Studiensetting einen Aufmerksamkeitswechsel vom Tablet zum Arbeitsblatt notwendig machte. Da mithilfe der Touch-Gestensteuerung die auf dem Tablet dargestellten Informationen beim Ausfüllen der Lücken beibehalten werden konnten und so die simultane Nutzung beider Medien ermöglicht wurde, ließ sich die Bearbeitung der Aufgaben mit der Touch-Gestensteuerung einfacher bewerkstelligen. Im Gegensatz dazu konnte die Information durch die Marker-based AR nur so lange auf dem Tablet dargestellt werden, wie sich der Trigger im Fokus der Kamera befand. Beim Eintragen eines Begriffs in die entsprechende Lücke musste das Tablet abgelegt werden, die Information riss ab und ein einfacher Übertrag war nicht möglich.

In LS10 könnten sich hinsichtlich dessen bereits Arbeitsstrategien entwickelt haben, sodass bspw. die Bearbeitung der Aufgabe in Partnerarbeit erfolgte. So konnte eine Person die Bedienung der App übernehmen und eine andere das Ausfüllen der Lücken. Darüber hinaus waren zahlreiche zuzuordnende Begriffe von Chloroplasten und Mitochondrien identisch (*Außen- und Innenmembran, Intermembranraum, ATPase und Ribosom*), sodass die Anforderungen an die Probanden bei LS10 abnahmen und daher möglicherweise keine Unterschiede bezüglich des LZ feststellbar waren.

Weitere Faktoren, die zur Beurteilung der Ergebnisse herangezogen werden müssen, sind psychologische Effekte, die durch neue Technologien bei den Nutzenden hervorgerufen werden. Es wird in einzelnen Studien darauf hingewiesen, dass AR zu einer Ablenkung von der eigentlichen Lernaufgabe führen kann (M.-B. Ibáñez & Delgado-Kloos, 2018; Kiryakova et al., 2018), die möglicherweise auf den Novelty-Effekt zurückzuführen (Dunleavy et al., 2009; Kamarainen et al., 2013) ist. Dass sich dies in LS10 nicht zeigte, könnte darin begründet liegen, dass die Probanden, die LS10 mit AR bearbeitete, bereits mit dem gleichen Aufgabentyp aus LS9 vertraut waren und es ihnen dadurch leichter fiel, die Aufgabe zu lösen (vgl. Worked-example-Effekt; Sweller & Cooper, 1985). Demnach fokussierte sich die Gruppe, die LS9 mit AR bearbeitete, primär auf die Technologie, sodass die eigentliche Lernaufgabe in den Hintergrund geriet. Dies konnte vereinzelt während der praktischen Durchführung der Studie beobachtet werden und hatte zur Folge, dass Hinweise zur Fokussierung auf die Aufgabe an die Lernenden gegeben werden mussten, um den zeitlichen Rahmen einhalten zu können.

Eine Möglichkeit zur Überprüfung dieser Erklärungsansätze für zukünftige Studien wäre durch eine Festlegung der einzuhaltenden Sozialform und durch eine veränderte Reihenfolge der LS gegeben. Dadurch wird eine Differenzierung dahingehend möglich, ob die beobachteten Effekte auf dem LS (Chloroplast) selbst oder auf dem Studiendesign beruhen.

7.1.3 Art des Triggers (Forschungsfrage 4): HoloBrain

Ein Ziel der HoloBrain-Studie war es, den Einfluss der Art des Triggers (2D-Gehirnscheibe oder 3D-QR-Cube) auf den LZ zu untersuchen. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des eingesetzten Triggers auf den LZ (vgl. S. 144). Dass eine Anpassung der Testinstrumente (vgl. Kapitel 5.4) durch den Wechsel auf eine alternative Plattform zu Erhebung des Vorwissens und des Lernerfolgs (und damit auch des LZ) notwendig war, muss bei der Interpretation und der Aussagekraft der Ergebnisse berücksichtigt werden. Darüber hinaus waren die beiden an der Studie teilnehmenden Gruppen hinsichtlich ihres Vorwissens uneinheitlich, sodass eine größere Stichprobe notwendig gewesen wäre, um diese Differenzen auszugleichen. Ob die gefundenen Gruppenunterschiede auf die Anpassung der Testinstrumente oder auf tatsächliche Leistungsunterschiede zurückzuführen sind, kann abschließend nicht geklärt werden.

Bei der Auswahl der Teilnehmenden sollte zukünftig auf homogenere Gruppen geachtet werden. Ein Ansatzpunkt wäre hierzu die Berücksichtigung der bereits absolvierten Module des Studiengangs, sodass den Teilnehmenden die studienrelevanten Inhalte nicht bekannt sind. Um das Vorwissen und den Lernerfolg zu messen, wurde bei der Detailstudie (aufgrund der leicht zu bewältigenden Aufgabenstellung) die Zeit als möglicher Trennfaktor herangezogen. Die Aufgabenstellungen könnten bei breiter angelegten Folgestudien durch mehrere Aufgaben mit sukzessiver Schwierigkeit ergänzt und unterstützt werden, um eine differenziertere Betrachtung der Ergebnisse – insbesondere unter Berücksichtigung des CL – zu ermöglichen.

7.2 Cognitive Load

Wie bereits ausführlich in Kapitel 2.3 beschrieben, werden bei der CLT drei Arten kognitiver Belastung differenziert: der ICL, der durch die Komplexität der Lerninhalte hervorgerufen wird, der ECL, der durch die Gestaltung der Lernmaterialien entsteht, sowie der GCL, der durch die Akquise neuer Schemata ins Langzeitgedächtnis ausgelöst wird. Anders als der ICL und der ECL ist der GCL positiv mit dem Lernen assoziiert und nicht der Additivitätshypothese unterlegen (Moreno & Park, 2010). Bei einer Revision der CLT wird nur noch von zwei Arten kognitiver Belastung (ICL und ECL) ausgegangen und der GCL wird als diejenige Ressource begriffen, die dem Umgang mit diesen Belastungen gewidmet (Kalyuga, 2011; Sweller, 2011; Sweller et al., 2011a). Der GCL stellt damit zwar keine mentale Belastung dar, dient aber als Indikator der Schemakonstruktion und lernförderlicher Elemente.

Neben den von Leppink et al. (2013) entwickelten Messinstrumenten zur Erfassung des ICL, des ECL und des GCL wird die unidimensionale Skala zur Erfassung des CL nach Paas (1992) diskutiert. Bei dieser wird nach der geistigen Anstrengung der Lernenden in Bezug auf eine

Lernaufgabe gefragt, sodass Paas' Skala der gesamten kognitiven Belastung (ICL und ECL) entspricht.

In den folgenden Kapiteln werden die Mittelwertvergleiche der CL der einzelnen Studienergebnisse diskutiert, indem Zusammenhänge zwischen der CLT und dem LZ erörtert und mit den Merkmalen einzelner LS in Beziehung gesetzt werden. Es werden jedoch zunächst auf Grundlage der Strukturgleichungsmodellierung mögliche Schlussfolgerungen zur Beziehung des CLT und des LZ gezogen.

7.2.1 Zusammenhangsanalysen (Forschungsfrage 1): Cognitive-Load-Theory und Lernzuwachs

Im Folgenden werden die in Kapitel 6.2.1 (Strukturgleichungsmodellierung) und 6.2.2 (multiple lineare Regression) beschriebenen Zusammenhänge kurz rekapituliert und daraus werden theoretische Implikationen für die CLT abgeleitet. Mithilfe der Strukturgleichungsmodellierung konnte ein positiv gerichteter Zusammenhang zwischen dem GCL und dem LZ festgestellt werden (vgl. Kapitel 6.2.1, S. 147). Demnach gilt: Je größer der GCL, desto größer ist der LZ. Unabhängig davon, ob die klassische Sichtweise der CLT (bspw. Sweller et al., 1998) betrachtet wird, bei der der GCL als eigenständiger, lernförderlicher (Entwicklung und Automatisierung von kognitiven Schemata) Load angesehen wird, oder die (Kalyuga, 2011; Sweller, 2011; Sweller et al., 2011a), bei der von zwei Loads (ICL und ECL) ausgegangen wird und der GCL als derjenige Load angesehen wird, der dem Umgang mit dem ICL gewidmet ist, kann der gefundene Zusammenhang als theoriekonform angesehen werden. Dies liegt darin begründet, dass sich die neuere Auffassung der CLT dem GCL nicht verweigert, sondern der GCL als Anteil des ICL angesehen wird (Sweller et al., 2011b, S. 57). Wird bspw. der ICL nicht bewältigt, beträgt der GCL 0, findet der Lernprozess jedoch uneingeschränkt statt, entspricht der GCL dem ICL (Leppink, 2017). Der GCL gibt daher Auskunft darüber, ob aus Sicht der Teilnehmenden ein Lernprozess stattgefunden hat. Er kann daher mit dem LZ in Beziehung gesetzt werden.

Weiterhin wird aus dieser Sichtweise der CLT deutlich, dass der ICL – wie im Strukturgleichungsmodell gezeigt – nur indirekt (über den GCL) zum LZ beitragen kann. Ein hoher ICL allein bewirkt noch keinen Lernprozess, erst dessen Verarbeitung durch den GCL. Der schwache Zusammenhang zwischen dem ICL und dem GCL könnte daraus resultieren, dass die Beziehung nicht stetig verläuft, sodass ein ICL nur lernförderlich sein kann, wenn das Arbeitsgedächtnis nicht an seine Kapazitätsgrenze geführt wird.

Weiterhin konnten durch die Strukturgleichungsmodellierung die lernhinderlichen Eigenschaften des ECL (Sweller & Chandler, 1994), die durch die Gestaltung und Präsentation der Aufgabenstellungen und Materialien entstehen, nachgewiesen und durch die im Rahmen

der Studie *Mitochondrien und Chloroplasten* durchgeführte multiple lineare Regressionsanalyse validiert werden (S. 149). Demnach besteht ein starker gerichteter negativer Zusammenhang zwischen dem ECL und dem GCL und damit indirekt auf den LZ. Der Zusammenhang kann wie folgt beschrieben werden: Je höher der ECL, desto niedriger sind die für das Lernen noch verfügbaren Arbeitsgedächtnisressourcen (GCL).

Weiterhin konnte ein positiv nicht gerichteter Zusammenhang durch die Kovarianzanalyse zwischen dem ICL und dem ECL festgestellt werden, sodass gilt: Je höher der ICL, desto höher ist der ECL und vice versa. Dieser Zusammenhang wurde bereits von Leppink et al. (2013; 2014) in den Studien zur Entwicklung und Evaluierung des Messinstruments identifiziert. Leppink et al. (2014) argumentieren, dass nach Sweller et al. (1998) gemäß der Additivitätshypothese der ICL und der ECL unabhängig voneinander sein sollten, und erklären den bestehenden Zusammenhang mit der Schwierigkeit der Probanden, zwischen den beiden Loads zu unterscheiden. Weiterhin erwägen die Autoren die Möglichkeit, dass die Items zur Erfassung des ICL und des ECL vielmehr eine Wahrnehmung der erwarteten Aufgabenkomplexität widerspiegeln als die tatsächlich auf das Arbeitsgedächtnis wirkende kognitive Last (Leppink et al., 2014).

Diesem Hindernis unterliegen jedoch alle subjektiven Ratingskalen des CL, da diese Messinstrumente in Erhebungen stets zeitlich nach der zu erfassenden kognitiven Belastung angewendet werden. Eine Erhebung während des Lernprozesses zur Messung der aktuellen kognitiven Belastung würde vermutlich dazu führen, dass die Ratingskalen selbst als lernhinderlich wahrgenommen werden und so eine Störgröße für die eigentliche Messung darstellen, da sich die Lernenden nach Beantwortung der Items erneut in die Aufgabe einfinden bzw. einlesen müssen. Weil auch in zahlreichen weiteren Studien (Becker et al., 2020; Hadie & Yusoff, 2016; Leppink et al., 2013; Thees et al., 2021; Zukić et al., 2016) ein Zusammenhang zwischen dem ICL und dem ECL festgestellt wurde, bleibt offen, ob diese Zusammenhänge auf der Schwierigkeit der Probanden, zwischen den Konstrukten zu unterscheiden, auf Messungenauigkeiten oder auf dem Fehlen geeigneter Messinstrumente (Leppink, 2017) beruhen. Darüber hinaus ist fraglich, ob die theoretische Trennung beider Loads überhaupt praktisch gegeben sein kann. Die Verbindung beider Loads könnte sich bspw. dadurch erklären lassen, dass komplexe Lerninhalte (ICL) auch eine komplexe Gestaltung (ECL) erforderlich machen, auf die die Instruktoren, nach Reduktion aller lernhinderlichen Aspekte (bspw. durch Berücksichtigung der bereits gefundenen CL-Effekte (Sweller et al., 2019)), nur noch einen geringen Einfluss haben. Umgekehrt ist denkbar, dass Lerninhalte (ICL) von Lernenden als komplex wahrgenommen werden, wenn die Gestaltung der Aufgabenstellung und der Lernmaterialien (ECL) kompliziert und damit lernhinderlich ist. Dieser Erklärungsansatz wird durch die der CLT zugrunde liegende Elementinteraktivität (Anzahl der Elemente, die gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis verarbeitet werden müssen)

(Moreno & Park, 2010) gestützt, auf der sowohl der ICL als auch der ECL beruhen (Sweller, 2010b; Sweller et al., 2019).

7.2.2 Art des Mediums (Forschungsfrage 2): Aufbau des Gehirns und Pathologie der Alzheimer-Demenz

Um einen Überblick zu geben, werden im Folgenden zunächst die allgemeinen Ergebnisse hinsichtlich des CL rekapituliert, bevor im Anschluss eine detaillierte Betrachtung der einzelnen LS erfolgt. Die Resultate zu den LS, in denen signifikante Unterschiede des LZ zwischen AR und EUM festgestellt wurden (vgl. Kapitel 6.1.1), werden mit den Ergebnissen der CLT in Beziehung gesetzt. Dies erfolgt auf Grundlage der in der Strukturgleichungsmodellierung nachgewiesenen Zusammenhänge.

Es konnten in vier der sieben LS signifikante Unterschiede in mindestens einer Dimension des CL festgestellt werden (S. 146). Die häufigsten Unterschiede waren mit der unidimensionalen Skala von Paas (1992) für den Gesamt-CL zu verzeichnen (LS5 bis LS8). Darüber hinaus konnten mit dem von Leppink et al. (2013) entwickelten Messinstrument Unterschiede im ICL (LS5, LS6 und LS8), im ECL (LS5) und für die Unterrichtseinheit *Pathologie der Alzheimer-Demenz* im GCL festgestellt werden. Es zeigte sich bezüglich der CL-Unterschiede ein heterogenes Bild hinsichtlich der eingesetzten Medien (AR oder EUM), sodass keine generalisierende Aussage über die Höhe der jeweiligen CL-Dimension in Abhängigkeit vom Medieneinsatz getroffen werden kann.

Garzón und Acevedo (2019) zeichnen in ihrer Metareflexion ein variables Bild der Studienlage im Zusammenhang von AR und dem LZ und berechnen eine mittlere Effektstärke von $d = .68$. Im Vergleich dazu betrug die mittlere Effektstärke in der vorliegenden Arbeit für den LZ mit AR $d = .42$ und liegt damit leicht unter dem von Garzón und Acevedo (2019) ermittelten Wert. Im Folgenden werden die verschiedenen LS anhand ihrer individuellen Konzeption analysiert und die Ergebnisse des LZ mit denen des CL verknüpft und diskutiert.

Lernsetting 1

In LS1 konnten keine Unterschiede hinsichtlich des CL festgestellt werden, jedoch wurde für die AR-Gruppe ein höherer LZ als für die Gruppe mit EUM ermittelt. Ziel der Aufgabe des LS war es, dass Lernende die Anatomie des menschlichen Gehirns (Gehirnareale) mit Fachbegriffen beschreiben können. Dazu sollten ebenfalls markante Strukturen (Sulci und Gyri) zur regionalen Aufteilung des Cerebellums in einzelnen Lappen identifiziert werden. Da bei der AR-Umsetzung die Projektion des 3D-Gehirns auf das Modell erfolgte, war es den Lernenden möglich, die Grenzen der einzelnen Areale mit den Finger nachzufahren und so die anatomischen Strukturen zur Aufteilung zu entdecken. Dagegen waren Lernende bei der EUM-Umsetzung gezwungen, mithilfe einer nebenliegenden Abbildung die dort gezeigten

Strukturen am Realmodell zu entdecken, was im Gegensatz zur AR-Umsetzung zu einem Split-Attention-Effekt führte. Dieser konnte jedoch nicht in den Messungen des ECL nachgewiesen werden. Ein möglicher Grund hierfür könnte sein, dass zwar während der Arbeit mit dem Modell der Split-Attention-Effekt verhindert werden konnte, dieser aber dennoch in beiden Umsetzungen bei der Ergebnisfixierung auftrat, also vom Modell oder der App in das dazugehörige Lernheft. Gestützt wird diese Annahme durch die zeitliche Erhebung des CL, die unmittelbar nach Fertigstellung der Aufgabe (Ergebnisfixierung) und nicht während der Lernaufgabe selbst erfolgte.

Lernsetting 5

In LS5 wurde ein signifikant höherer LZ für die AR-Umsetzung bei gleichzeitig höheren CL-Werten in den Dimensionen CL, ICL und ECL festgestellt. Da eine Erhöhung des ICL (und ECL) zu einer Erhöhung des CL führt, stützen die Ergebnisse die Additivitätshypothese der CLT sowie das von Paas (1992) entwickelte Messinstrument. Ziel der Aufgabe war die Erstellung einer Tabelle, in der den verschiedenen Gehirnregionen Funktionen zugeordnet werden sollten. Die AR-Umsetzung basierte auf der Projektion eines digitalen Gehirnmodells auf ein abstraktes, zweidimensionales Triggerbild (Marker-based AR), bei dem on Demand die Funktionen auf die farbig markierten Areale eingeblendet wurden. Die EUM-Umsetzung beruhte hingegen auf der Textexzerption der Funktionen der Gehirnareale.

Die Struktur der Aufgabe kann daher mögliche Erklärungsansätze für die Ergebnisse liefern: Der höhere ICL der AR-Umsetzung könnte in der notwendigen Verknüpfung mit vorherigen Aufgaben (vor allem LS1) begründet liegen, da die Beschriftung der Areale mit Namen nicht in der App gegeben war. Dies machte eine Reorganisation des Wissens erforderlich. Hingegen fanden bei der EUM-Umsetzung sowohl die Areale mit Namen als auch deren Funktionen im Text Erwähnung, sodass hier lediglich von einer Reproduktionsleistung ausgegangen werden kann. Der niedrigere ECL-Wert für EUM gibt weiterhin Hinweise darauf, dass der ECL möglicherweise durch Fähig- und Fertigkeiten der Lernenden beeinflussbar ist, da auf bereits bekannte Arbeitstechniken zurückgegriffen werden kann (vgl. Worked-Example-Effekt; Sweller & Cooper, 1985). Nach derzeitiger Fassung der CLT gilt ein vergleichbarer Zusammenhang bisher nur für den Einfluss des Vorwissens auf den ICL (Moreno & Park, 2010). Im konkreten Fall von LS5 ist davon auszugehen, dass die Textexzerption eine vertraute Arbeitstechnik für die Lernenden darstellte. Die GCL-Werte beider Umsetzungen wiesen zwar keine signifikanten Unterschiede auf, befanden sich aber im Vergleich zu den anderen LS der Studie auf einem hohen Niveau. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass trotz der zuvor diskutierten Unterschiede anderer CL-Dimensionen der Lernprozess ungehindert stattfinden konnte.

Darüber hinaus konnte in der Strukturgleichungsmodellierung zwar ein direkter kausaler Zusammenhang des GCL auf den LZ belegt werden, jedoch erklärt dieser mit $\beta = .234$ und $p = .014$ nur einen Teil des LZ. Die bereits angesprochene notwendige inhaltliche Verknüpfung zwischen LS1 und LS5 der AR-Umsetzung könnte gemäß der Kriterien kognitiv herausfordernder Aufgaben (Mehren & Mehren, 2020) über die Tiefenstrukturen des Unterrichts einen wesentlichen Einfluss auf den LZ gehabt haben. Diese Annahme wird ebenfalls durch den höheren LZ in LS1 bei gleichen CL-Werten bekräftigt, da der notwendige Rückbezug von LS5 auf LS1 zu einer intensiveren Auseinandersetzung mit dem Unterrichtsgegenstand führte und neues Wissen zur Lösung der Aufgabe reorganisiert werden musste. Um diese Effekte zu unterbinden, kann es für zukünftige Erhebungen sinnvoll sein, unabhängige Aufgabenformate einzusetzen. In der vorliegenden Studie wurde dies abgelehnt, da ein Ziel darin bestand, ein möglichst authentisches Unterrichtsszenario abzubilden.

Lernsetting 6

In LS6 konnten signifikante Unterschiede in den CL-Dimensionen des CL und des ICL zwischen AR und EUM festgestellt werden, was die Additivitätshypothese der CLT bestätigt. Die Untersuchungsszenarien unterscheiden sich jedoch nicht hinsichtlich des LZ. Ziel der Aufgabe war der äußere Vergleich beider Gehirnmodelle (Gehirn einer gesunden Person und Gehirn einer Alzheimerpatientin), um die pathologischen Veränderungen beschreiben zu können. Zur Hervorhebung der äußeren Unterschiede wurden bei der AR-Umsetzung die Sulci in Rot über das weiße Realmodell projiziert. Die digitale Projektion war so gestaltet, dass sich die Sulci in der dargestellten Breite unterschieden. Die EUM-Umsetzung beinhaltete hingegen eine Abbildung, die aus Bildschirmaufnahmen der AR-Umsetzung gestaltet war.

Da für den direkten Vergleich die Informationen räumlich getrennt vorlagen, war in beiden Untersuchungsszenarien mit einem Split-Attention-Effekt zu rechnen, der zu einer Erhöhung des ECL führt, sodass die vorliegenden Ergebnisse theoriekonform sind. Die Unterschiede der Untersuchungsszenarien beruhen auf der Techniknutzung und dem Gerätehandling. Ein möglicher Erklärungsansatz für die Unterschiede des ICL findet sich in der Argumentation von Leppink et al. (2014), wonach die Schwierigkeit der Probanden, zwischen dem ICL und dem ECL (der auch in der Strukturgleichungsmodellierung nachgewiesen wurde), zu unterscheiden, als Grund für den engen Zusammenhang gesehen wird. Somit besteht die Möglichkeit, dass der ECL bei AR aufgrund zusätzlicher Interaktionsmöglichkeiten und der Bedienung des Tablets höher liegen sollte, sich dies aber im ICL anstatt im ECL niederschlug. Ungeachtet dessen waren die gefundenen Unterschiede im ICL zu gering, um starke Effekte indirekt über den GCL im LZ zu zeigen: Nach Huber et al. (2007) kann dieser Mediationseffekt über die Multiplikation der Pfadkoeffizienten von ICL und GCL sowie GCL und LZ berechnet

werden. Da dies einem schwachen Effekt entspricht, haben Unterschiede im ICL nur geringe Auswirkungen auf den LZ.

Weiterhin waren das Gerätehandling und das damit verbundene Erlernen der Arbeitstechnik nicht Gegenstand der Erhebungen, sodass sich diese Aspekte auch nicht im LZ bemerkbar machen konnten. Das Ziel für zukünftige Untersuchungen sollte es daher sein, den Umgang mit den Geräten und die Bedienung der Technik als zusätzlich zu erhebende Faktoren zu implementieren.

Lernsetting 7

In LS7 konnte kein signifikanter Unterschied im LZ, jedoch einer innerhalb der CLT festgestellt werden. Ziel der Aufgabe war es, die pathologischen Veränderungen der Alzheimer-Demenz anhand eines medialen Frontalschnitts zu beschreiben. Es wurde in der EUM-Umsetzung auf originale MRT-Daten zurückgegriffen, die einen Vergleich zwischen dem Gehirn einer gesunden Person und dem Gehirn einer Alzheimerpatientin zuließen und die graue sowie die weiße Substanz darstellten. Da dieselben MRT-Daten die Grundlage zum 3D-Druck der Gehirnscheibe waren, relevante Strukturinformationen (graue und weiße Substanz) jedoch durch den Druck mit nur einem Polymer verloren gingen, wurden diese Informationen mittels AR auf die gedruckten Gehirnscheiben projiziert und so wiederhergestellt. Weil in beiden Untersuchungsszenarien durch den direkten Vergleich beider Gehirnscheiben die Informationen räumlich voneinander getrennt vorlagen, war mit dem Split-Attention-Effekt zu rechnen. Wären dementsprechend Unterschiede im ECL feststellbar gewesen, wären diese auf andere Ursachen zurückzuführen gewesen. Da der Zugang zu den Informationen in der AR-Umsetzung eine zusätzliche Bedienung des Tablets erforderte und dies die Nutzung erschwerte, wäre mit vergleichsweise höheren ECL-Werten zu rechnen gewesen.

In Anbetracht dessen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen: Eine Generalisierung der CL-Effekte bezogen auf ein Medium ist kaum möglich, da CL-Effekte an die individuelle Gestaltung des Mediums und den Nutzungskontext gebunden sind. Lernhinderliche Eigenschaften des Medieneinsatzes (bspw. zusätzliches Handling des Tablets), schlagen sich nicht zwangsläufig im ECL nieder, sofern diese mit lernförderlichen Eigenschaften des Mediums kompensiert werden können (bspw. motivationaler Charakter von AR). Infolgedessen ist die CLT limitiert in der Erklärung möglicher Unterschiede des LZ. Dies deckt sich mit den Darlegungen von Korbach et al. (2018) sowie Moreno und Park (2010), nach denen die CLT keine Lerntheorie, sondern ein psychologisches Framework zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen kognitiver Architektur, Instruktion und Lernen ist. Damit besteht der wesentliche Unterschied zu einer Lerntheorie darin, dass bei der CLT besonders Fälle in den Fokus gestellt werden, in denen Lernen nicht oder nur eingeschränkt möglich ist. Sie liefert hierzu über die unterschiedlichen CL-Dimensionen mögliche Erklärungen. Davon

ausgehend werden Effekte formuliert, die berücksichtigt werden können, um auf die CL-Dimensionen Einfluss zu nehmen und so Lernen zu erlauben. In Fällen, in denen der Lernprozess uneingeschränkt möglich war, kann sie also nur eingeschränkt und nicht allein zur Erklärung herangezogen werden (Magner et al., 2014; Park et al., 2015), was sich auch im Zusammenhang mit dem Element-Interactivity-Effekt (Sweller, 1994) zeigt.

Lernsetting 8

In LS8 konnten signifikante Unterschiede im LZ sowie signifikant höhere Werte im CL und im ICL für Lernende mit EUM festgestellt werden. Ziel der Aufgabe war es, die pathologischen Veränderungen der Alzheimer-Demenz im zeitlichen Verlauf beschreiben zu können. Es wurde in der AR-Umsetzung eine schematische Abbildung, die die graue und die weiße Substanz zeigte, auf die Gehirnscheibe (3D-Druck) des medialen Frontalschnitts projiziert. Mithilfe eines Schiebereglers auf dem GUI konnte der Verlust der grauen Substanz bei fortschreitender Erkrankung dargestellt werden und Regionen, in denen der Schwund stattfindet, konnten identifiziert werden. Bei der EUM-Umsetzung erhielten die Lernenden eine schematische Bilderreihe, die ebenfalls den Substanzverlust in den einzelnen Phasen der Krankheit im medialen Frontalschnitt zeigte. Um betroffene Regionen identifizieren zu können, mussten die Bilder miteinander verglichen werden, was einen Split-Attention-Effekt induzierte.

Ein möglicher Erklärungsansatz für den höheren LZ bei der Bearbeitung mit EUM ist die intensivere Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand, die durch den Bildervergleich zur Identifizierung betroffener Hirnregionen provoziert wird. Die Bearbeitung der Aufgabe in der AR-Umsetzung verhinderte zwar das Auftreten des Split-Attention-Effekts, war jedoch vergleichsweise weniger kognitiv herausfordernd, wozu auch der niedrigere ICL als ein Indiz gewertet kann. Weiterhin gilt der ICL als ein positiv gerichteter Prädiktor für den GCL – und damit indirekt für den LZ –, was einen – wenn auch geringen – Einfluss auf den LZ gehabt haben dürfte. Wie bereits die Betrachtung der Ergebnisse zu LS6 und die Erkenntnisse von Leppink et al. (2014) gezeigt haben, lassen sich die Konstrukte ICL und ECL nicht vollständig voneinander trennen (vgl. Strukturgleichungsmodellierung in Kapitel 6.2.1, S. 147), weshalb es den Probanden schwergefallen sein könnte, zwischen diesen beiden Konstrukten zu unterscheiden. Wie bereits in LS7 erörtert, lassen sich Unterschiede im LZ nicht in allen Fällen durch die CLT erklären, da sie nicht als Lerntheorie gesehen werden kann (Moreno & Park, 2010).

7.2.3 Art der Steuerung (Forschungsfrage 3): Mitochondrien und Chloroplasten

Ziel der Studie war es, den Einfluss der Steuerungsart (AR-Steuerung oder Touch-Gestensteuerung) auf den CL zu untersuchen, um einerseits Rückschlüsse auf den LZ zu ermöglichen und andererseits die Steuerungsarten evidenzbasiert für den unterrichtlichen Einsatz beurteilen zu können. Die Ergebnisse der multiplen linearen Regression zur Aufklärung von Zusammenhängen innerhalb der CLT sind bereits in der Analyse in Kapitel 7.2.1 enthalten, sodass an dieser Stelle Redundanzen vermieden werden.

Weder in LS9, in LS10 noch im Mittel beider LS konnten in den untersuchten CL-Dimensionen signifikante Unterschiede festgestellt werden (vgl. S. 149). Bei beiden Arten der Steuerung wurde die Komplexität (Elementinteraktivität) der Lerninhalte identisch gehalten, was einen Vergleich erleichterte und zu ausbleibenden Unterschieden im ICL führte. Da jedoch in den Untersuchungsszenarien die Lernmaterialien in Bezug auf die Steuerung der App und hinsichtlich der dargebotenen Informationen verändert wurden, wären Unterschiede im ECL zu erwarten gewesen. Insbesondere dadurch, dass die AR-Steuerung eine realitätsnähere und damit natürlichere Art der Steuerung (vgl. Kapitel 4.2 und 5.1) darstellt, wäre ein niedrigerer ECL als bei der Touch-Gestensteuerung denkbar gewesen. Da jedoch die AR-Steuerung den Einbezug der Realität (bspw. Handling des Triggers, Abstand der Kamera) wie auch der Virtualität (Interaktion mit dem GUI und den dargebotenen Informationen) erfordert, was in einer höheren Elementinteraktivität (und damit in einem höheren ECL) resultiert, wäre auch der gegensätzliche Fall denkbar. In Anbetracht beider Erklärungsansätze könnten sich diese Effekte kollektiv aufgehoben haben.

Aufgrund der Additivität des ICL und des ECL (Sweller, 2010a) sowie der Eigenschaft des von Paas (1992) entwickelten Messinstruments, die gesamte kognitive Belastung zu erfassen, wäre ein Unterschied im CL nur dann zu erwarten gewesen, wenn dieser auch in mindestens einer der beiden anderen Dimensionen (ICL und ECL) aufgetreten wäre. Da dies nicht der Fall war, kann dieses Teilergebnis als theoriekonform bewertet werden. Vergleichbar dazu sind auch die Ergebnisse des GCL zu werten: Da der ICL und der ECL Prädiktoren (vgl. Kapitel 6.2.1, 6.2.2 und 7.2.2) für den GCL darstellen, wäre nur in solchen Fällen mit Unterschieden im GCL zu rechnen gewesen, in denen signifikante Unterschiede im ICL und im ECL vorliegen oder in denen zusätzliche lernförderliche Elemente zum Tragen kommen.

Wie bereits im vorherigen Kapitel 7.2.2 detailliert erläutert, lassen sich signifikante Unterschiede im LZ (hier LS9) zugunsten der Touch-Gestensteuerung nicht zwangsläufig mit der CLT umfassend aufklären. Gründe hierfür können in der CLT selbst liegen, da bspw. CL-Effekte besonders stark in Situationen hoher kognitiver Belastung auftreten (Magner et al., 2014; Park et al., 2015). Weil dies jedoch weder in LS9 noch in LS10 der Fall war (hoher GCL

und niedriger ICL/ECL als Indikatoren), besteht die Möglichkeit, dass die zu erwartenden Effekte zu gering waren, um mit der vorhandenen Stichprobengröße aufklären zu können. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob die eingangs erläuterte Verknüpfung der Realität mit der Virtualität (durch Manipulation des Triggers, des Tablets und der GUI) bei den Lernenden während der Bewertung der ECL-Testitems berücksichtigt wurde, da die Testitems generisch nach *Aufgabenstellung*, *Materialien* und *Informationen* formuliert sind und die Handhabung der Materialien lediglich implizieren. Mögliche Wege, diesen Faktor zu berücksichtigen, bestehen in der Anpassung der Testinstrumente oder in einem ersten Schritt indirekt über einzelne Nutzungserlebnis-Dimensionen (vgl. Kapitel 7.3.3).

Da die Ergebnisse der CLT keine direkte Erklärung für den gefundenen Unterschied im LZ geben, sei an dieser Stelle auf die bereits in Kapitel 7.1.2 diskutierten Erklärungsansätze verwiesen. Aus Sicht der CLT kann der Einsatz einer AR-Steuerung zur Betrachtung digitaler 3D-Modelle legitim sein, da dieser im Vergleich zur etablierten Touch-Gestensteuerung zu keiner Erhöhung des ECL bzw. zu keiner Verringerung des GCL führt.

7.2.4 Art des Triggers und der medialen Repräsentation (Forschungsfragen 4 und 5): HoloBrain

Mit der Detailstudie HoloBrain zur Untersuchung von Triggereffekten wurde das Ziel verfolgt, den Einfluss der Triggerart (2D-Gehirnscheibe oder 3D-Gehirncube) und den Einfluss der medialen Repräsentation (AR-Hirnmodell oder Papiermodell) auf den CL zu ermitteln. Im Folgenden werden die Untersuchungsszenarien und Studienergebnisse kurz skizziert, um diese anschließend hinsichtlich der CLT diskutieren zu können.

Bei der 2D-Gehirnscheibe handelte es sich um dieselben 3D-Drucke des medialen Frontalschnitts (Gesunder-Gehirntyp), wie sie auch in den Studien zum Aufbau des Gehirns und zur Pathologie der Alzheimer-Demenz Verwendung fanden. Um diese wurde entsprechend der Lage des Schnitts mittels AR ein 3D-Gehirn projiziert, sodass dieses durch Rotation der 2D-Gehirnscheibe von allen Seiten betrachtet werden konnte. Der 3D-QR-Cube entsprach einem Würfel mit einer Kantenlänge von 6 cm mit sechs unterschiedlichen Markern (QR-Codes) an den Seiten. Wie auch bei der 2D-Gehirnscheibe wurde ein 3D-Gehirn mittels AR auf bzw. um den Würfel projiziert, sodass sich der 3D-QR-Cube im Inneren des virtuellen Gehirns befand und sich ebenfalls mittels Rotation des Würfels steuern ließ. Es wurde angenommen, dass die Nutzung der 2D-Gehirnscheibe dem 3D-QR-Cube hinsichtlich des ECL unterlegen sei, da der 3-QR-Cube eine unterbrechungsfreie 360°-Betrachtung des Gehirns ermöglicht, wohingegen bei der 2D-Gehirnscheibe die Projektion unterbrochen wird, wenn die Kante der 2D-Gehirnscheibe senkrecht zur Kamera positioniert wird.

In beiden Untersuchungsszenarien konnten zusätzliche Informationen wie die farbige Hervorhebung der Gehirnareale sowie deren Beschriftung über die GUI eingeblendet werden. Die durch die Unterbrechung provozierten lernhinderlichen Eigenschaften der 2D-Gehirnscheibe spiegelten sich jedoch, entgegen der Annahme, weder in den Mittelwertunterschieden des ECL noch in dem GCL wider (vgl. S. 152). Es wurde allerdings ein signifikanter Unterschied im ICL festgestellt, was darauf hindeutet, dass die 2D-Gehirnscheibe einen höheren ICL bei den Lernenden provoziert. Ein möglicher Erklärungsansatz sind die zusätzlichen Informationen der 2D-Gehirnscheibe, etwa die Form und Lage im Gehirn, und die daraus resultierende engere Verknüpfung (i. S. eines Informationsaustausches) zwischen Realität und Virtualität. Der 3D-QR-Cube hingegen enthielt durch seine abstrakte Gestaltung keine weiteren inhaltlichen Informationen und diente lediglich der Wiedergabe der AR-Lernumgebung. Wie bereits ausführlich in anderen LS diskutiert, könnte ein weiterer Grund des Auftretens von Unterschieden im ICL, nicht aber im ECL, in dem theoretischen Zusammenhang beider CLs liegen, der eine systematische Trennung durch das eingesetzte Messinstrument erschwert.

Für den Vergleich der medialen Repräsentation wurden die CL-Daten der 2D-Gehirnscheibe und des 3D-QR-Cube zusammengefasst, um diese mit dem Papiermodell vergleichen zu können. Während im ICL kein Unterschied festgestellt wurde, fiel der ECL für das Papiermodell signifikant höher und der GCL fiel signifikant niedriger aus (vgl. S. 153). Beiden medialen Repräsentationen lagen die gleichen Aufgabeninhalte (Aufbau des menschlichen Gehirns und Benennung einzelner Areale) zugrunde, die Repräsentationen unterschieden sich aber deutlich in ihrer Gestaltung, was sich direkt auf den ECL auswirkte. Das Papiermodell wies einerseits einen hohen Abstraktionsgrad in Form und Größe auf und andererseits waren mehr Gehirnareale (zweisprachig) beschriftet, als dies bei dem AR-Hirnmodell der Fall war. Diese für das Lernen teils irrelevanten Informationen sowie der Abstraktionsgrad resultierten in einem höheren ECL und entsprechend der CLT in einem niedrigeren GCL.

Die Ergebnisse können daher zwar als theoriekonform beurteilt, aber nicht generalisiert werden. Zum einen Bedarf es dazu einer Erhöhung der Stichprobe und zum anderen eines Vergleichs, der nur eine Form der AR einbezieht. Darüber hinaus ist eine neue Konzeptionalisierung des Studiendesigns erforderlich: Bei den CL-Daten des Papiermodells kann es sich gemäß des derzeitigen Studiendesigns lediglich um eine subjektive Einschätzung der kognitiven Belastung handeln, da der eigentliche Lernprozess (und die Erfassung des Lernerfolgs) zuvor im Rahmen des Vergleichs der Triggerarten erfolgte. Dennoch eröffnen die vorliegenden Ergebnisse einen Ausgangspunkt für zukünftige Studien zur Untersuchung des Einflusses der medialen Repräsentation auf den CL.

7.3 Nutzungserlebnis

Ziel der einzelnen Studien war die differenzierte Betrachtung von AR-basierten Lernumgebungen, um Rückschlüsse auf deren Lernwirksamkeit zu ermöglichen. Zur Realisierung einer mehrdimensionalen Betrachtung und zur Beantwortung der dieser Arbeit zugrunde liegenden Fragestellungen ist der Einsatz weiterer Messinstrumente neben der Erfassung des LZ und der Messung des CL notwendig. Diese multiperspektivische Betrachtung ermöglicht es einerseits, ein ganzheitliches Bild über die Ursachen und Zusammenhänge der Lernwirksamkeit von AR-basierten Lernumgebungen zu geben, andererseits können bestehende Zusammenhänge der erfassten psychologischen Konstrukte aufgedeckt werden.

Gerade bei der Erforschung von digitalen Lernumgebungen bedarf es einer professionellen Berücksichtigung der Mensch-Computer-Interaktion, da sie die Gebrauchstauglichkeit in „einem bestimmten Nutzungskontext [...], um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ (DIN, 2018-11-00, S. 6), sicherstellt. Im Kontext der vorliegenden Studien eignete sich daher die Erfassung der UX – im Gegensatz zur Erfassung der Benutzerfreundlichkeit –, weil damit auch die Beziehung der Nutzenden zum Produkt abgedeckt und eine vielschichtige Analyse ermöglicht wurde. Zur Messung der UX wurde das von Laugwitz et al. (2008) entwickelte Messinstrument UEQ eingesetzt.

In den folgenden Kapiteln werden zunächst die Ergebnisse der Strukturgleichungsmodellierung und der MANOVA analysiert, die neue Zusammenhänge zwischen der UX und der CLT darlegen. Darüber hinaus werden die jeweiligen Resultate der UX rekapituliert, um Auffälligkeiten anhand bestimmter App-Merkmale analysieren und diskutieren zu können.

7.3.1 Zusammenhangsanalysen (Forschungsfrage 1): Cognitive-Load-Theory und Nutzungserlebnis

Im Folgenden werden die in den Kapiteln 6.3.1 (Strukturgleichungsmodellierung) und 6.3.2 (MANOVA) beschriebenen Zusammenhänge zwischen der CLT und der UX kurz skizziert, um diese anschließend analysieren und beurteilen zu können.

Durch die Strukturgleichungsmodellierung, die auf den Daten der Studien *Aufbau des Gehirns* und *Pathologie der Alzheimer-Demenz* basierte, konnte ein valides Modell der CLT und der UX mit einem guten Model-Fit extrahiert werden (vgl. S. 156). Zusätzlich wurde dieses Modell in der Studie *Mitochondrien und Chloroplasten* mittels MANOVA validiert (vgl. S. 160). Auch unter Einbezug der UX haben die bereits in Kapitel 6.2.1 beschriebenen und in Kapitel 7.2.1 diskutierten Zusammenhänge innerhalb der CLT weiter Bestand. Es konnten keine

signifikanten Zusammenhänge zwischen den pragmatischen Qualitätskriterien (Steuerbarkeit, Durchschaubarkeit sowie Effizienz) und dem ECL identifiziert werden. Das hedonische Qualitätskriterium Stimulation steht hingegen in einem negativ gerichteten Zusammenhang mit dem ECL und in einem positiv gerichteten Zusammenhang mit dem GCL, sodass gilt: Je besser die Stimulation, desto niedriger ist der ECL und desto höher ist der GCL.

Weiterhin zeigte sich über die Kovarianz eine positive Assoziation zwischen der Effizienz und der Stimulation. Nach Schrepp (2018b) zeichnet sich eine hohe Stimulation durch eine interessante Gestaltung aus, die geistig anregend und motivierend ist. Durch die gestalterische Komponente wirkt die Stimulation zum einen direkt auf den ECL ein, der u. a. durch die Gestaltung der Lernmaterialien induziert wird. Zum anderen sind die geistige Anregung und die dadurch entstehende Motivation Bestandteil jahrzehntelanger Lernforschung (Harandi, 2015; McCombs, 1991; Nichols & Miller, 1994; Pintrich, 2003; Rafiola et al., 2020), sodass über die Motivation als lernförderlicher Faktor (GCL) breiter Konsens herrscht. Damit sind die Ergebnisse konsistent mit den von Su (2016) beschriebenen Zusammenhängen und zeigen, dass AR-basierte Lernumgebungen sich positiv auf die Lernmotivation auswirken. Die Stimulation stellt damit ein relevantes Analysewerkzeug im Kontext lernförderlicher Gestaltung und Reduktion kognitiver Belastung dar. Die Verbindung zwischen der Stimulation und der Effizienz lässt sich indirekt ebenfalls über die Gestaltung der Gehirn-AR-App erklären: Demnach wird der gestalterische Rahmen (als Teil der Stimulation) durch die übergeordnete Organisationsstruktur der AR-App vorgegeben, diese Struktur ist wiederum maßgeblich für die Effizienz verantwortlich, da sie den Zweck verfolgt, dass Nutzende mit minimalen Eingaben und geringem Aufwand ihr Ziel erreichen können.

7.3.2 Einfluss des Nutzungserlebnisses auf den Cognitive Load (Forschungsfrage 1): Aufbau des Gehirns und Pathologie der Alzheimer-Demenz

Ein weiteres Ziel der Studien zum Aufbau des Gehirns und zur Pathologie der Alzheimer-Demenz war es, den Einfluss der UX auf die CLT zu erfassen, um weitere Faktoren zur Beurteilung der Lernwirksamkeit von AR-basierten Lernumgebungen identifizieren zu können. Dazu richtet sich der Fokus auf die Einzelergebnisse des Benchmark-Vergleichs, bei dem das Nutzungserlebnis der Gehirn-AR-App mit den Ergebnissen von 495 Produktevaluationen bei einer Stichprobengröße von $n = 20\,190$ (Schrepp, 2019) verglichen wurde.

Entsprechend dem Untersuchungsdesign wurde die Gehirn-AR-App am Ende der Unterrichtseinheit im Rahmen der Abschlussbefragung evaluiert. Dabei zeigten sich besonders hohe Werte innerhalb der hedonischen Qualitätsmerkmale Stimulation und Originalität. Die Attraktivität als übergeordnete Dimension, die den Gesamteindruck der App

widerspiegelt, sowie die pragmatischen Qualitätskriterien Durchschaubarkeit und Effizienz wurden als überdurchschnittlich eingestuft. Lediglich die Dimension der Steuerbarkeit erhielt die Wertung unterdurchschnittlich (vgl. S. 155).

Die hervorragenden Bewertungen der hedonischen Qualitätskriterien geben Aufschluss darüber, dass es sich bei der Gehirn-AR-App um ein neuartiges, originelles und kreatives Produkt (Originalität) handelt. Dies ist im Einklang mit den Vorerfahrungen der Lernenden (vgl. Abb. 17, S. 103), die mehrheitlich nicht mit dem Einsatz von AR vertraut waren. Nach Schrepp (2018b) deuten die hohen Werte der Stimulation auf eine interessante Gestaltung der Gehirn-AR-App hin. Diese wurde also als geistig anregend und motivierend empfunden. Die Ergebnisse der pragmatischen Qualitätskriterien veranschaulichen die intuitive Bedienbarkeit (Durchschaubarkeit), sodass diese von den Lernenden schnell und leicht erlernt werden konnte. Weiterhin führte die Art der Gestaltung und Programmierung der Gehirn-AR-App (vgl. Kapitel 5.2) zu einer geringen System-Antwortzeit, wodurch Latenzzeiten minimiert werden konnten. Darüber hinaus waren zur Zielerreichung minimale Nutzereingaben (Effizienz) notwendig, sodass von einer effizienten Navigation ausgegangen werden kann.

Das unterdurchschnittliche Abschneiden in der Dimension der Steuerbarkeit deutet darauf hin, dass die Lernenden Hindernisse im Gefühl der Kontrolle über das System und bei der Vorhersehbarkeit verspürten. Dies könnte zum einen aus dem Studiendesign hervorgegangen sein, das bspw. die Bedienung der App stark instruktionalisierte, sodass den Lernenden wenig Raum gegeben wurde, die App zu entdecken. Zum anderen konnte je nach Kamerawinkel oder Lichteinfall auf die Trigger und bei weiteren Faktoren die AR-Projektion plötzlich abbrechen, da der eingesetzten Image-based AR-Technologie zu wenige Referenzpunkte für den Renderprozess zur Verfügung standen. Die Kombination aus dem Auftreten des plötzlichen Abbruchs und der Unkenntnis der Nutzenden über die technischen Hintergründe könnte zu einer Einschränkung der Vorhersehbarkeit geführt haben. Sind alle Entwicklungsmöglichkeiten, bspw. die Verbesserung der Triggereigenschaften, eine Änderung des AR-Typs oder die Optimierung der Rechenprozesse, ausgeschöpft, empfiehlt sich eine Aufklärung der Nutzenden über die korrekte Bedienung der App, in deren Rahmen mögliche Probleme thematisiert werden.

7.3.3 Art der Steuerung (Forschungsfrage 3): Mitochondrien und Chloroplasten

Ein Ziel der Studie *Mitochondrien und Chloroplasten* war es, den Einfluss der Steuerungsart (AR-Steuerung oder Touch-Gestensteuerung) auf die UX zu untersuchen sowie LS9 und LS10 hinsichtlich ihrer UX zu charakterisieren. Zunächst erfolgt die UX-Analyse der eingesetzten App mithilfe des Benchmark-Vergleichs (Schrepp, 2019).

Es traten exzellente Werte innerhalb der hedonischen Qualitätsmerkmale Stimulation und Originalität sowie in der Attraktivität (spiegelt Gesamteindruck der App wider) auf. Während die pragmatischen Qualitätskriterien Durchschaubarkeit und Effizienz als gut eingestuft wurden, erzielte die Dimension Steuerbarkeit zwar überdurchschnittliche Werte, wies damit jedoch die niedrigste Bewertung der App auf (vgl. S. 158). Da sich die eingesetzte App kaum von der zuvor diskutierten Gehirn-AR-App hinsichtlich ihrer Gestaltung, ihrer Organisationsstruktur und ihrer Funktionsweise unterscheidet, wird an dieser Stelle auf die Diskussion im vorangegangenen Kapitel 7.3.2 verwiesen, um Redundanzen zu vermeiden. Stattdessen wird der Fokus auf den Vergleich der beiden Steuerungsarten innerhalb der App gelegt und deren Effekte auf die UX mit den bisherigen Erkenntnissen der Studie verknüpft.

Im direkten Vergleich der Steuerungsarten verzeichnete die AR-Steuerung hinsichtlich der Attraktivität signifikant höhere Bewertungen als die Touch-Gestensteuerung, sodass erstere bei den Teilnehmenden eine bessere allgemeine Zufriedenheit auslöste. In der Durchschaubarkeit hingegen bestanden keine Unterschiede, sodass beide Steuerungsarten eine intuitive Bedienung ermöglichten bzw. diese schnell und leicht erlernt werden konnte. Angesichts der verbreiteten Implementation der Touch-Gestensteuerung in einer Vielzahl von Apps und Web-Anwendungen sowie vor dem Hintergrund, dass für viele Lernende die AR-Steuerung ein Novum darstellte, können beide Steuerungsarten miteinander konkurrieren. Wie angenommen, wurden in der Dimension der Effizienz keine Unterschiede festgestellt, da sich die Untersuchungsszenarien hinsichtlich der Renderprozesse (und damit der System-Antwortzeit) sowie der Organisationsstruktur der App nicht unterschieden. In der Steuerbarkeit konnten ebenfalls keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, sodass die Lernenden ein Gefühl der Kontrolle über die App hatten und diese in vorhersehbarer Weise auf Eingaben reagierte.

Ein plötzlicher Abbruch der AR-Projektion, wie er im Fall der Gehirn-AR-App als Grund für eine unterdurchschnittliche Bewertung der Steuerbarkeit diskutiert wurde, trat in der vorliegenden App nicht auf. Da kein kausaler Ortsbezug zwischen der Realität (Trigger) und der Virtualität (AR-Projektion) hergestellt werden musste, konnten größere Gestaltungsspielräume der Image-based AR genutzt und die Trigger konnten optimiert werden, wodurch eine zuverlässige, unterbrechungsfreie AR-Projektion realisiert wurde. Wie aus den

vorangegangenen Ausführungen hervorgeht, wurden bei keinem der pragmatischen Qualitätskriterien (Durchschaubarkeit, Effizienz und Steuerbarkeit) signifikante Unterschiede festgestellt. Mit beiden Steuerungsarten konnten die angestrebten Aufgaben und Ziele gleichermaßen erfüllt werden. Zusammenhänge zwischen den pragmatischen Qualitätskriterien und der CLT konnten ausgeschlossen werden (vgl. Kapitel 6.3.1, 7.3.1 und 7.3.2).

Innerhalb der hedonischen Qualitätskriterien konnte die AR-Steuerung in der Dimension der Stimulation signifikant höhere Werte erzielen, wohingegen in der Dimension der Originalität keine Unterschiede feststellbar waren. Die Stimulation wird durch eine interessante Gestaltung hervorgerufen, die geistig anregend und dadurch motivierend wirkt (Schrepp, 2018b), sodass sich, entsprechend der in Kapitel 7.3.1 diskutierten Zusammenhänge zwischen der Stimulation und dem ICL bzw. GCL, an dieser Stelle das lernwirksame Potenzial von AR zeigte. Jedoch schienen die genannten Stimulationsunterschiede der untersuchten Steuerungsarten zu gering zu sein, um zu signifikanten Unterschieden im ECL und GCL zu führen. In anderen Studien (Stumpp et al., 2019; Wang et al., 2015), in denen der Einfluss von AR auf die UX mittels UEQ untersucht wurde, zeigten sich signifikante Unterschiede hinsichtlich der Originalität zugunsten von AR. Die Autoren begründeten dies mit dem Innovationscharakter der Technologie. Da in der vorliegenden Untersuchung keine Unterschiede hinsichtlich der Originalität beobachtet werden konnte, ergeben sich folgende Erklärungsansätze: Die AR-Technologie wurde aus Sicht der Lernenden nicht als innovativ und kreativ wahrgenommen oder aber die Nicht-AR-Umsetzung (Touch-Gestensteuerung) wurde als ebenso neuartig wahrgenommen wie die AR-Technologie. In Anbetracht der Vorerfahrungen der Lernenden mit AR und digitalen Medien (vgl. Abb. 17, S. 103) – insbesondere im schulischen Kontext – erscheint letztere Erklärung plausibler.

Im Folgenden werden die UEQ-Dimensionen, unabhängig von der Steuerungsart, der beiden LS (LS9: Chloroplast; LS10: Mitochondrium) miteinander verglichen und in Bezug auf die bisherigen Ergebnisse hin diskutiert. Das LS10 weist in vier der sechs UEQ-Dimensionen signifikant höhere Werte auf als LS9 (vgl. S. 160). Der Gesamteindruck von LS10 hat also zu einer allgemein höheren Zufriedenheit (Attraktivität) bei den Lernenden geführt. Hinsichtlich der Dimension Durchschaubarkeit konnten keine Unterschiede festgestellt werden, sodass davon ausgegangen werden kann, dass in beiden LS eine intuitive Bedienung der App möglich war. Die signifikanten Unterschiede innerhalb der Effizienz sind ein Indiz dafür, dass es den Lernenden leichter möglich war, die angestrebten Aufgaben und Ziele in LS10 zu erfüllen. Gründe hierfür sind womöglich in der zeitlichen Abfolge der LS zu finden: Da LS10 stets nach LS9 absolviert wurde, waren die Lernenden bereits mit der GUI und der allgemeinen Funktionsweise der App vertraut, sodass sich diese Übungseffekte in der Effizienz niederschlugen. Weiter unterschieden sich die beiden LS nicht hinsichtlich der Steuerbarkeit,

sodass die Lernenden stets das Gefühl der Kontrolle über die App hatten und diese in vorhersehbarer Weise auf Eingaben reagierte.

Die Unterschiede innerhalb der beiden hedonischen Qualitätskriterien deuten darauf hin, dass LS10 interessanter gestaltet und dadurch motivierender (Stimulation) war sowie als innovativer und kreativer wahrgenommen wurde. Da sich beide LS nur hinsichtlich der AR-Projektionen unterschieden, könnten die Differenzen im Fall der Stimulation auf die Darstellungen der eingesetzten 3D-Modelle zurückzuführen sein, wobei das Mitochondrien-Modell als optisch ansprechender empfunden wurde. Darüber hinaus könnten Reihenfolge-Effekte (Order-Effects) die Bewertung beeinflusst haben, da die nachfolgende Bewertung (LS10) von der vorherigen Bewertung (LS9) beeinflusst wurde (Haugtvedt & Liu, 2010), sodass die Lernenden zunächst dazu tendierten, die App streng zu bewerten, und davon ausgehend in der nachfolgenden Bewertung mildere Antworten gaben.

7.3.4 Art des Triggers und mediale Repräsentation (Forschungsfragen 4 und 5): HoloBrain

Ein Ziel der HoloBrain-Studie war es, den Einfluss des Triggers auf die UX zu untersuchen, um mögliche Auswirkungen der Triggerart einer differenzierten Analyse unterziehen zu können und Rückschlüsse auf andere Ergebnisse zu ziehen. Darüber hinaus wurde die HoloBrain-App einer komparativen Analyse mit dem Papiermodell unterzogen. Doch zunächst soll die HoloBrain-App anhand des Benchmark-Vergleichs (Schrepp, 2018b) analysiert werden.

Der Benchmark-Vergleich der HoloBrain-App zeigte ein ähnliches Bild wie es sich bei den Hauptstudien ergab: Hinsichtlich der pragmatischen Qualitätskriterien (Durchschaubarkeit, Effizienz und Steuerbarkeit) erreichte die HoloBrain-App überdurchschnittliche Ergebnisse. Bezogen auf die hedonischen Qualitätskriterien (Stimulation und Originalität) wurde die App von den Lernenden als exzellent bewertet, woraus sich der ebenfalls exzellente Gesamteindruck (Attraktivität) erklären lässt (vgl. S. 162). Es kann also davon ausgegangen werden, dass die App zu einer hohen allgemeinen Zufriedenheit (Attraktivität) bei den Lernenden geführt hat, sie in der Lage waren, die App intuitiv zu bedienen (Durchschaubarkeit), sie so mit minimalem Aufwand die gewünschten Ziele erreichen konnten (Effizienz) und dabei ein Gefühl der Kontrolle über das System hatten (Steuerbarkeit). Bestimmte Funktionen der App wurden erst nach Ablauf eines Timers freigeschaltet; diese Kontrolleinschränkung scheint jedoch keine negativen Auswirkungen auf die Steuerbarkeit gehabt zu haben. Die exzellente Bewertung der Stimulation deutet auf die interessante Gestaltung der App und der dargebotenen Inhalte hin und gibt Aufschluss über das motivationale Potenzial der AR-Technologie. Die HoloBrain-App wurde von den Studierenden

als neuartig und originell wahrgenommen, ohne dass sich dies durch Brechen mit bekannten Konventionen nachteilig auf die Durchschaubarkeit auswirkte.

Im direkten Vergleich der UX nach Art des Triggers (3D-QR-Cube oder 2D-Gehirnscheibe) konnten in keiner der Dimensionen signifikante Unterschiede festgestellt werden (vgl. S. 163). Zur Aufklärung, ob von einer gleichen UX beider Untersuchungsszenarien ausgegangen werden kann oder ob die Effekte bisher zu klein waren, sind weitere Untersuchungen mit einer Erhöhung der Stichprobe notwendig. Auf Grundlage der größten Mittelwertdifferenzen der bisherigen Daten ließen sich diese Unterschiede vor allem in den Dimensionen Attraktivität, Effizienz und Originalität erwarten. Demnach hinterließ die 2D-Gehirnscheibe einen besseren Gesamteindruck bei den Studierenden und wurde gleichzeitig als innovativer und kreativer eingeordnet. Dies könnte auf Synergieeffekte der zukunftsweisenden Technologien (3D-Druck und AR) zurückzuführen sein.

Die größten Unterschiede hinsichtlich der UX wurden im direkten Vergleich des AR-Hirnmodells und des Papiermodells verzeichnet. Es konnten in fünf der sechs Nutzungserlebnis-Dimensionen signifikante Unterschiede festgestellt werden (vgl. S. 164). Das AR-Hirnmodell führte zu einer größeren allgemeinen Zufriedenheit (Attraktivität) bei den Studierenden, da es sich intuitiver bedienen ließ (Durchschaubarkeit) und sich die gewünschte Aufgabe mit minimalen Eingaben erfüllen ließ (Effizienz). Mögliche Gründe für die niedrigere Durchschaubarkeit des Papiermodells könnten in der allgemeinen Konstruktion des Modells liegen, da der Hirnstamm nicht permanent am Groß- und Kleinhirn befestigt war und als loser Sockel genutzt wurde, wodurch eine ganzheitliche Betrachtung entweder nur stationär möglich war oder beide Hände genutzt werden mussten. Zum anderen könnten der größere Abstraktionsgrad (Größe und Form) sowie die Anzahl und die Sprache der Beschriftung die Bedienung erschwert haben.

Die Ergebnisse zeigten außerdem, dass in der Dimension der Steuerbarkeit keine signifikanten Unterschiede feststellbar waren, was als weiteres positives Indiz für die AR-Steuerung (vgl. Kapitel 7.3.3) gesehen werden kann. Die Steuerung des AR-Hirnmodells über eine Interaktion mit diesem löste bei den Studierenden das gleiche Gefühl der Kontrolle aus wie das haptische, real vorhandene Papiermodell. Die großen Differenzen innerhalb der hedonischen Qualitätskriterien (Stimulation und Originalität) legen auf Grundlage der in Kapitel 7.3.1 diskutierten Zusammenhänge zwischen der CLT und der UX dar, wie signifikante Unterschiede bei der Stimulation zu ebenfalls signifikanten Unterschieden im ECL und GCL führen können (vgl. Kapitel 6.2.3).

7.4 Empfundene Lernunterstützung

Neben objektiven Messungen des LZ und subjektiven Ratingskalen zur Erfassung des CL sowie der UX wurde die ELU von AR und EUM erhoben, um einen weiteren lernrelevanten Faktor in die Bewertung der Lernwirksamkeit von AR zu integrieren. Das eigens dazu entwickelte Testinstrument wurde auf Grundlage der in Kapitel 2.7 beschriebenen theoretischen Hintergründe konstruiert sowie einer Reliabilitäts- und einer Hauptkomponentenanalyse unterzogen und das finale Messinstrument wurde durch eine konfirmatorische Faktorenanalyse mit einem sehr guten Model-Fit bestätigt (vgl. Kapitel 5.9.4).

Die für die Hauptstudien erhobenen Daten der ELU für AR und EUM wurden durch Mittelwertvergleiche gegenübergestellt, um so eine Medienpräferenz der Teilnehmenden ableiten zu können. Zusätzlich wurden die in Kapitel 2.7 beschriebenen theoretischen Zusammenhänge zur CLT mittels Strukturgleichungsmodellierung (vgl. Kapitel 6.4.1) nachgewiesen und durch die Berechnung der Pearson-Produkt-Moment-Korrelation in Kapitel 6.4.2 überprüft. Zur Diskussion und Beurteilung der Ergebnisse werden diese in den folgenden Unterkapiteln kurz dargestellt und in Bezug zu den bisherigen Resultaten gesetzt.

7.4.1 Zusammenhangsanalyse: Empfundene Lernunterstützung und Cognitive-Load-Theory

Das Strukturgleichungsmodell (a) weist einen guten Model-Fit auf und bestätigte die angenommenen Zusammenhänge zwischen der ELU und der CLT (vgl. S. 167). Demnach bestehen nicht gerichtete Zusammenhänge zwischen der ELU und dem ECL sowie der ELU mit dem GCL. Es gilt: Je höher die ELU, desto niedriger ist der ECL und desto höher ist der GCL und vice versa. Neben dem in Kapitel 6.4.1 dargestellten finalen Modell wurde ein weiteres theoretisches Modell (b) getestet, bei dem von gerichteten Zusammenhängen ausgegangen wurde, sodass ein niedriger ECL und ein hoher GCL zu einer höheren ELU führt, aber nicht umgekehrt. Grundlage dieser Überlegungen war es, dass der CL während der Aufgabenbearbeitung bzw. während des Lernprozesses auftritt und eine Reflexion über die wahrgenommene Nützlichkeit (vgl. TAM nach Davis et al. (1989)) eines Mediums erst nach Abschluss dieses Lernprozesses stattfindet. Zum Vergleich beider Modelle wurde neben den Model-Fit-Indices zusätzlich das Akaike-Informationskriterium (AIC) als Modellvergleichsindex verwendet. Dabei wird das Modell, das den niedrigsten AIC-Wert aufweist, im Hinblick auf eine gute Modellanpassung und die Einfachheit des Modells im Vergleich zu konkurrierenden Modellen präferiert. Das in Kapitel 6.4.1 dargestellte Modell (a) setzte sich durch.

Ein Grund für die bessere Modellanpassung könnte sein, dass zwar die Annahme korrekt ist, dass die wahrgenommene Nützlichkeit nur retrospektiv empfunden wird und infolgedessen von gerichteten Zusammenhängen ausgegangen werden kann, dieser Erklärungsansatz

jedoch die Benutzungsfreundlichkeit als weitere Variable des TAM nicht berücksichtigt. Diese tritt indes bereits bei der Mediennutzung auf und ist damit Teil des Lernprozesses. Die nicht gerichteten Zusammenhänge zwischen der ELU und dem ECL bzw. GCL lassen sich also über die Kombination der retrospektiv wahrgenommenen Nützlichkeit mit der auf den Lernprozess einwirkenden Benutzungsfreundlichkeit erklären. Somit konnte nicht nur, wie von Ifinedo (2018) belegt, ein Zusammenhang zwischen der ELU und der wahrgenommenen Nützlichkeit des TAM festgestellt werden, sondern es konnten auch Argumente für einen Zusammenhang zwischen der ELU und der Benutzungsfreundlichkeit (i. S. d. TAM) hervorgebracht werden. Neben den Zusammenhängen der Strukturgleichungsmodellierung konnte in der konfirmatorischen Faktorenanalyse eine moderat negative Korrelation zwischen der ELU von AR und der ELU von EUM identifiziert werden. Dies zeigt, dass Lernende eine starke Präferenz hinsichtlich der Art des Mediums entwickeln, sodass oftmals eine Zuneigung zu EUM mit einer Abneigung gegenüber AR einhergeht (und vice versa).

7.4.2 Art des Mediums (Forschungsfrage 2): Aufbau des Gehirns und Pathologie der Alzheimer-Demenz

In der Studie *Aufbau des Gehirns und Pathologie der Alzheimer-Demenz* konnte ein signifikanter Unterschied der ELU zwischen AR und EUM, zugunsten von EUM, festgestellt werden (vgl. S.166). Aufgrund der von Ifinedo (2018) belegten Zusammenhänge zwischen der ELU und dem TAM nach Davis et al. (1989) kann davon ausgegangen werden, dass EUM eine höhere wahrgenommene Nützlichkeit (Perceived Usefulness) zugeschrieben wird. Da das TAM darüber hinaus die wahrgenommene Benutzungsfreundlichkeit (Perceived Ease of Use) als Variable beinhaltet – und diese kongruent mit den pragmatischen Qualitätskriterien des UEQ (vgl. Kapitel 7.3.2) ist – wird AR eine geringere wahrgenommene Nützlichkeit als EUM beigemessen – bei gleichzeitig überdurchschnittlichen Bewertungen hinsichtlich der wahrgenommenen Benutzungsfreundlichkeit.

Weil sich jedoch der UEQ auf die Erfassung der UX der Gehirn-AR-App fokussierte, war ein direkter Vergleich der wahrgenommenen Benutzungsfreundlichkeit von AR und EUM nicht möglich und es bedarf weiterer Untersuchungen. Zudem kann nach Ifinedo (2018) die ELU zwar als ein Indikator für das Lernen selbst gesehen werden, der Zusammenhang zwischen der ELU und dem LZ konnte sich jedoch weder in den Mittelwertvergleichen des LZ manifestieren, noch konnte er mittels Strukturgleichungsmodellierung nachgewiesen werden. Neben den theoriebasierten Erklärungsansätzen sollten auch die Lerngewohnheiten bei der Betrachtung der ELU berücksichtigt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Teilnehmenden in ihrer bisherigen schulischen Laufbahn Lernstrategien und Arbeitstechniken für den Umgang mit EUM entwickelt haben. Dadurch sind sie geübt darin, bspw. Informationen aus Texten zu exzerpieren, Abbildungen zu beschreiben oder Tabellen auszuwerten. Diese

Übung und Routine fehlte den Lernenden jedoch beim Einsatz von AR im schulischen Kontext, sodass diese Arbeitstechniken zunächst auf einen neuen Kontext übertragen und geübt werden mussten, bevor sie zielführend eingesetzt werden konnten.

7.4.3 Art des Mediums (Forschungsfrage 2): Mitochondrien und Chloroplasten

Da sich die Testitems zur Erfassung der ELU konkret auf die mediale Unterscheidung zwischen AR und EUM fokussierten, sind nicht, wie bei den zuvor diskutierten Ergebnissen der Studie *Mitochondrien und Chloroplasten*, die Steuerungsarten (AR- oder Touch-Gestensteuerung) Gegenstand der Betrachtung. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der vorangegangenen Studie zum Aufbau des Gehirns und zur Pathologie der Alzheimer-Demenz bewerteten die Lernenden die ELU für AR signifikant höher als die ELU für EUM (S. 169). Diese diametralen Resultate könnten auf der stärkeren Gewichtung der UX der zugrunde liegenden Studie und auf der Anlehnung der ELU an das TAM beruhen. Bereits während der App-Entwicklung wurde im Hinblick auf das Studiendesign ein Schwerpunkt auf die UX gelegt, indem bspw. die sieben Qualitätskriterien der EN ISO 9241-110 (DIN, 2020-10-00) stärkere Berücksichtigung fanden, wodurch ebenfalls im Vergleich zur Gehirn-AR-App bessere Bewertungen im Benchmark-Vergleich der UX erzielt wurden. Diese überdurchschnittlich hohen Bewertungen setzten sich zu großen Teilen aus der Benutzungsfreundlichkeit (pragmatische Qualitätskriterien) zusammen.

Durch die enge Verknüpfung der ELU und des TAM (vgl. Kapitel 7.4.2) befindet sich ebendiese Benutzungsfreundlichkeit in der Schnittmenge der drei Theorien. Die Benutzungsfreundlichkeit kann dementsprechend als zentrale Stellschraube für die UX sowie für die Akzeptanz neuer Technologien (TAM) und für die ELU angesehen werden. Da mit der vorliegenden Arbeit nicht das Ziel verfolgt wird, empirische Beiträge und Implikationen zur Erweiterung des TAM zu geben, bedarf es zu einer konkreten Aufklärung der diskutierten Zusammenhänge entsprechender Folgestudien. Die Studienlage zur Weiterentwicklung des TAM durch Integration zusätzlicher Variablen ist jedoch vielversprechend (z.B. B. Cheng et al., 2011; I.-F. Liu et al., 2010; Lowe et al., 2013).

Als Limitation der diskutierten Ergebnisse kann der ungleiche Einsatz von AR und EUM im Untersuchungskontext gesehen werden, da unklar ist, ob der Tablet-basierte Medieneinsatz des Nicht-AR-Szenarios von den Lernenden als *klassisches Medium* (Wortlaut der Frageitems) wahrgenommen wird. Dies ist stark von den bisherigen Unterrichtserfahrungen abhängig. Nehmen die Lernenden die Nicht-AR-basierten Lernumgebungen nicht als klassische Medien wahr, können Rezenzeffekte auftreten, sodass AR als Medium stärker im Gedächtnis präsent ist als bspw. die klassischen Medien der vorherigen Unterrichtsstunde.

Um dem entgegenzuwirken, wurde den Frageitems eine kurze Auflistung möglicher klassischer Unterrichtsmedien beigefügt.

Gerade im Vergleich mit den Ergebnissen der ELU im Zuge der Studie *Aufbau des Gehirns und Pathologie der Alzheimer-Demenz* (vgl. Kapitel 7.4.2), deuten die Ergebnisse darauf hin, dass AR aufgrund des Fehlens von wirksamen EUM als lernwirksamer wahrgenommen wird. Dieser Effekt nivelliert sich jedoch, sobald die gleiche Aufgabe in einem konkreten Aufgabenszenario mit EUM gelöst werden soll. Ebenso ist denkbar, dass aufgrund des geringeren Umfangs der Arbeit mit AR in der Studie *Mitochondrien und Chloroplasten* im Vergleich zur Studie *Aufbau des Gehirns und Pathologie der Alzheimer-Demenz* der Novelty-Effekt stärker hervortrat. Erstere Studie beinhaltete nur zwei LS mit AR – im Vergleich zu sieben LS bei der anderen Studie. Der nur kurze Einsatz von AR verstärkt den Novelty-Effekt, wobei dieser in umfangreicheren Einsatzszenarien abklingt. Zur Erhöhung der Aussagekraft der Ergebnisse und zur weiteren Validierung des entwickelten Testinstruments bedarf es weiterer Untersuchungen in anderen Kontexten, unter Berücksichtigung psychologischer Wahrnehmungseffekte.

7.5 Immersion

Laut der derzeit dominierenden Sicht wird Immersion als ein psychologischer Zustand des völligen Eintauchens in eine medialisierte Umwelt begriffen (Witmer & Singer, 1998, S. 227). Sie ist nach Weibel und Wissmath (2011) eng mit dem Flow- (Nakamura & Csikszentmihalyi, 2009) und dem Presence-Konzept (Witmer & Singer, 1998) verwandt. In einigen Studien konnten bereits positive Auswirkungen immersiver virtueller Umgebungen auf das Lernen beschrieben werden (bspw. Brown & Cairns, 2004; M. T. Cheng et al., 2015; M.-T. Cheng et al., 2017; Georgiou & Kyza, 2017b; Schrader & Bastiaens, 2012).

Zur Erfassung der Immersion wurde der von Georgiou und Kyza (2017b) entwickelte ARI-Fragebogen eingesetzt, bei dem zwischen drei Ebenen der Immersion unterschieden wird: Engagement, Inanspruchnahme und totale Immersion. Diesen Ebenen liegen weitere Subskalen zugrunde, darunter die angesprochenen Konzepte Flow und Presence. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Detailstudie diskutiert.

7.5.1 Art des Triggers und medialer Repräsentation (Forschungsfragen 4 und 5): HoloBrain

Das Ziel der Detailstudie *HoloBrain* war es, die Einflussnahme der Triggerart und der medialen Repräsentation auf die Immersion zu untersuchen, um so erste Einblicke in ein noch junges Forschungsfeld zu erhalten. Innerhalb der drei Ebenen der Immersion konnten bei Engagement und Inanspruchnahme keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Hingegen wurde auf der Ebene der totalen Immersion ein signifikanter Unterschied zugunsten der 2D-Gehirnscheibe im Vergleich zum 3D-QR-Cube ermittelt (vgl. S. 172). In Kombination mit den in Kapitel 7.3.4 diskutierten Ergebnissen der UX, bei der die 2D-Gehirnscheibe hinsichtlich der Originalität nicht signifikant, jedoch mit der größten Mittelwertdifferenz im Vergleich zu den übrigen Dimensionen bewertet wurde, zeigten sich hier Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen der Immersion und der Originalität. Bestärkt wird dies dadurch, dass es das „Ziel einer originellen Gestaltung [ist], die Aufmerksamkeit auf sich zu ziehen“ (Schrepp, 2018b, S. 61), sodass ein originelles Produkt das „Eintauchen in eine mediatisierte Umwelt“ (Witmer & Singer, 1998, S. 227) begünstigen könnte. Darüber hinaus wird nach Schrepp (2018a, S. 67) die Immersion zwar „eher selten“ bei der Erfassung der UX berücksichtigt, er beschreibt aber in diesem Zusammenhang, dass die „Immersion [...] in gewisser Weise die auf das maximale Maß gesteigerte Stimulation [ist]“, sodass hier ebenfalls ein möglicher Zusammenhang besteht, der jedoch aufgrund der zu kleinen Stichprobe nicht umfassend untersucht werden konnte.

Darüber hinaus zeigten die Ergebnisse, dass die – häufig zugunsten funktionaler Kriterien verschobene – kreative und originelle Gestaltung der Trigger einen positiven Einfluss auf die UX und die Immersion hatte. Um das Potenzial von AR-basierten Lernumgebungen optimal nutzen zu können, sollte die Gestaltung der Trigger bei der Entwicklung zukünftiger AR-Apps stärker berücksichtigt werden. Darüber hinaus ergänzt die Art des Triggers die von Georgiou und Kyza (2017a) identifizierten 21 Immersionsfaktoren von AR. Während Georgiou und Kyza (2018) sowie M. T. Cheng et al. (2015) einen positiven Zusammenhang zwischen der niedrigsten Stufe der Immersion (Engagement) und dem LZ, nicht aber zwischen den höheren Stufen der Immersion (Inanspruchnahme und totale Immersion) und dem LZ feststellten, konnte im Rahmen der HoloBrain-Studie in keiner der Immersionsebenen ein positiver Zusammenhang mit dem LZ ermittelt werden. Dies könnte auf die zu geringe Stichprobe zum Nachweis kleinerer Effekte oder auf die notwendigen Anpassungen des Pre- und Post-Tests (vgl. Kapitel 5.4) zurückzuführen sein.

Auch wenn der generell signifikante LZ (Mittelwertvergleich Vorwissen und Lernerfolg) für die Lernwirksamkeit von AR spricht, wurden erhebliche Vorwissensdifferenzen zwischen den beiden untersuchten Gruppen festgestellt. Das hohe Vorwissen einer Gruppe schränkte den

potenziell möglichen LZ ein. Dies kann wiederum eine mögliche Fehlerquelle bei Zusammenhangsanalysen der Immersion und des LZ darstellen, da ein möglicher Zusammenhang nur identifiziert werden kann, wenn auch ein Lernvorgang im Sinne der Wissensaneignung stattgefunden hat bzw. stattfinden konnte.

Weiter ist die Studienlage dahingehend unklar, in welchem stochastischen Zusammenhang die Immersion und der LZ stehen. M. T. Cheng et al. (2015) argumentieren, dass nicht alle Teilnehmenden die höheren Stufen der Immersion erreichten und so lediglich ein Zusammenhang zwischen der untersten Immersionsebene (Engagement) und dem LZ festgestellt werden konnte. Diese Annahme beruht jedoch auf einem linearen Zusammenhang beider Variablen. Es wäre auch denkbar, dass Teilnehmende in den höheren Stufen der Immersion so sehr eintauchen, dass die eigentliche Lernaufgabe in den Hintergrund gerät. Dieses Szenario ist besonders in Fällen plausibel, in denen das Immersionserleben rein auf dem eingesetzten Medium und nicht auf der zu erledigenden Aufgabe beruht. Ist es also das Ziel, die Lernwirksamkeit einer AR-Lernumgebung durch Erreichen höherer Ebenen der Immersion zu steigern, muss gewährleistet sein, dass nicht nur AR als Medium, sondern die Kombination aus Aufgabe und Medium zu diesem Erleben führt.

Neben dem Einfluss der Art des Triggers wurde auch der Einfluss der Art der medialen Repräsentation (AR-Hirnmodell oder Papiermodell) auf die Immersion untersucht. Es konnten in allen drei Ebenen der Immersion signifikante Unterschiede zugunsten des AR-Hirnmodells festgestellt werden (vgl. S. 173). Aufgrund des Studiendesigns können zwar keine Rückschlüsse auf den LZ gezogen werden (da der LZ bereits zum Vergleich der Triggerarten erfasst wurde), jedoch konnte über die Reliabilitätsanalyse gezeigt werden, dass der ARI-Fragebogen mittels adäquater Itemformulierung auch zuverlässig zur Erfassung der Immersion in Nicht-AR-basierten Untersuchungsszenarien eingesetzt werden kann.

8 Fazit

Während zahlreiche Publikationen zu AR im Bildungskontext existieren, fehlt es häufig an einer differenzierten Betrachtung von AR als Medium. Daher wurden im Rahmen dieser Dissertation auf Grundlage verschiedener AR-typischer Merkmale (vgl. Abb. 2, S. 9) die lernwirksamen Potenziale von AR in authentischen biologischen Lernumgebungen untersucht. Das Ziel war es, neben den direkt mess- und erfassbaren Parametern wie dem LZ eine mehrdimensionale Betrachtung von AR zu ermöglichen und so spezifische Einblicke in die Potenziale des Mediums für den unterrichtlichen Einsatz geben zu können. Im Folgenden werden die in den vorangegangenen Kapiteln diskutierten Einzelergebnisse anhand der zugrunde liegenden Fragestellungen der einzelnen Studien (vgl. Kapitel 4) zusammengefasst.

FF1 Welche theoretischen Zusammenhänge zwischen den Variablen der unterschiedlichen Testinstrumente lassen sich bestätigen?

Die gefundenen Zusammenhänge zwischen dem LZ und der CLT haben gezeigt, dass der GCL ein wesentlicher Prädiktor für den LZ ist und somit eine Erhöhung des GCL zu einer Erhöhung des LZ führt. Darüber hinaus konnten für den ICL und den ECL jeweils indirekte Effekte (über den GCL) auf den LZ festgestellt werden. Dies bedeutet, dass der ICL und der ECL keine direkten Prädiktoren für den LZ sind, sodass sich erst durch deren Prozessierung im Sinne der Schemakonstruktion Effekte auf den LZ zeigen. Dies ist insofern konsistent mit der Revision der CLT (Kalyuga, 2011; Sweller, 2011; Sweller et al., 2011a), die den GCL nicht als zusätzliche Belastung des Arbeitsgedächtnisses begreift. In Anbetracht der gefundenen Zusammenhänge zeigten sich positive Effekte des ICL bzw. negative Effekte des ECL auf den GCL, sodass der ECL deutlich stärker mit dem GCL assoziiert ist als der ICL. Dies macht die Annahme von Sweller (2010b) plausibel, als das es Arbeitsgedächtniskapazitäten geben muss, um den ECL zu verarbeiten (ER). Infolgedessen erfasst das Messinstrument des GCL zwar Arbeitsgedächtnisressourcen, die dem Lernen gewidmet sind, diese entsprechen jedoch nicht der von Leppink et al. (2014) getroffenen Annahme, dass sich diese ausschließlich dem ICL zuordnen lassen. Vielmehr bezieht der GCL die nach Addition des ICL und des ECL noch verfügbaren Arbeitsgedächtniskapazitäten ein.

Wird der GCL nun als die Arbeitsgedächtnisressourcen begriffen, die dem Umgang beider Loads gewidmet sind, lassen sich die jeweiligen Effekte wie folgt erklären: Der ICL wirkt primär lernförderlich auf den GCL, da er durch neu zu erlernende Informationen hervorgerufen wird und so Arbeitsgedächtnisressourcen aktiviert, um diese in kognitive Schemata des Langzeitgedächtnisses zu übertragen. Der ECL, der durch die lernhinderliche Gestaltung der Lernmaterialien hervorgerufen wird, beansprucht ebenfalls einen Teil der verfügbaren

Arbeitsgedächtnisressourcen, sodass weniger freie Arbeitsgedächtnisressourcen zur Verfügung stehen. Kommt es folglich zu einer Erhöhung des ECL, bspw. durch irreführende Gestaltung der Lernmaterialien, stehen weniger Arbeitsgedächtnisressourcen zur Verarbeitung des ICL zur Verfügung.

Dies lässt jedoch unberücksichtigt, dass es, wie von Sweller et al. (2011a) spekuliert, eine funktionale Differenzierung des Arbeitsgedächtnisses gibt, wodurch Ressourcen zur Verarbeitung des ICL (GR) und des ECL (ER) existieren. Lernen könnte bereits durch Auslastung einer der jeweiligen Arbeitsgedächtnisressourcen und durch die Überschreitung der allgemeinen Arbeitsgedächtniskapazität behindert werden. Der nicht gerichtete Zusammenhang zwischen dem ICL und dem ECL wurde bereits während der Entwicklung und Validierung der Messinstrumente (Leppink et al., 2013; Leppink et al., 2014) sowie in weiteren vergleichbaren Studien (Becker et al., 2020; Hadie & Yusoff, 2016; Leppink et al., 2013; Thees et al., 2021; Zukić et al., 2016) festgestellt – wenn auch selten diskutiert. Während die Autoren des Messinstruments den Zusammenhang des ICL und ECL auf die Schwierigkeit der Probanden zurückführen, zwischen den Konstrukten zu unterscheiden, stellt sich die Frage, ob diese Konstrukte überhaupt unabhängig sein können, da beide durch die Elementinteraktivität hervorgerufen werden (Sweller, 2010b; Sweller et al., 2019). Somit hängen die kognitive Belastung, die durch die Interaktivität der jeweilige Aufgabe wesentlichen Elemente (ICL), und die kognitive Belastung, die aus einem (lernhinderlichen) Instruktionsdesign (ECL) erwächst (Sweller, 2010b), zusammen. Aus Sicht von Instruktionsdesignern (z. B. Lehrkräften) zeigt sich dies auch bei der Aufgabengestaltung, da komplexe Lerninhalte (ICL) auch eine komplexe Gestaltung (ECL) erforderlich machen bzw. sich die Aufgaben nicht beliebig unkomplizierter darstellen lassen, ohne die Lerninhalte zu reduzieren. Den umgekehrten Fall veranschaulicht die Argumentation von Leppink et al. (2014), nach der eine komplexe Gestaltung (ECL) dazu führt, dass Lerninhalte (ICL) von den Lernenden als kompliziert wahrgenommen werden.

Als ein weiteres Kriterium zur Beurteilung der Lernwirksamkeit von AR wurde die UX gesehen, da sowohl spezielle Eigenschaften eines Produkts zur Erreichung angestrebter Ziele der Nutzenden als auch die Wirkung der Produkte auf die Nutzenden selbst erfasst werden. Anknüpfungspunkte zur CLT sind im starken Fokus auf die Reduktion irrelevanter kognitiver Belastung (Hollender et al., 2010), in der Vermeidung des Split-Attention-Effekts bei der Softwareentwicklung (Chalmers, 2003; Nielsen, 1994), in der intuitiven Gestaltung zur Reduktion des ECL (Oviatt et al., 2006; Sawicka et al., 2008) und in der Stimulation zur geistigen Anregung und Motivation der Nutzenden (Schrepp, 2018b; Su, 2016) zu sehen. Das entsprechende Strukturgleichungsmodell (vgl. Kapitel 6.3.1) verdeutlicht, dass sich das lernförderliche Potenzial von AR-basierten Lernumgebungen vor allem in der UEQ-Dimension der Stimulation gezeigt hat. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangte auch Su (2016) in Bezug auf

spielebasiertes Lernen (Gamification), sodass die Zusammenhänge als kontextübergreifend angenommen werden können. Die Stimulation zeigte eine negative Verbindung zum ECL, sodass ein hoher ECL mit einer niedrigen Stimulation kovariiert. Darüber hinaus zeigen sich Hinweise lernwirksamer Eigenschaften der Stimulation durch die positive Assoziation mit dem GCL. Die pragmatischen Qualitätskriterien der UX, die zur Erreichung der angestrebten Ziele der Nutzenden mit dem Produkt eine Rolle spielen, zeigten keine Verbindungen zur CLT. Die Stimulation stellt damit eine Schlüsseldimension der UX zur Beurteilung der Lernwirksamkeit von AR-basierten Lernumgebungen dar und ist ein relevantes Analysewerkzeug im Kontext lernförderlicher Gestaltung und Reduktion kognitiver Belastung.

Ein weiteres Kriterium zur Beurteilung von Medien hinsichtlich ihrer Lernwirksamkeit und der Wahrscheinlichkeit zur späteren Weiternutzung ist die ELU. Dabei lassen sich theoretische Bezüge zum TAM, zur UX sowie zur CLT herstellen. Im Strukturgleichungsmodell (vgl. Kapitel 6.4.1) konnten ein negativ nicht gerichteter Zusammenhang mit dem ECL sowie ein positiv nicht gerichteter Zusammenhang zum GCL über die jeweiligen Kovarianzen festgestellt werden. Auch wenn bei der ELU der Blick retrospektiv auf den mediengestützten Lernprozess gerichtet wird, kann diese nicht als Regressand durch den ECL und den GCL (als Regressoren) behandelt werden. Dies liegt vermutlich an der Verbindung zum TAM (Davis et al., 1989; Ifinedo, 2018), das u. a. die wahrgenommene Nützlichkeit eines Mediums und die empfundene Benutzungsfreundlichkeit als Variablen beinhaltet. Während sich der Eindruck der wahrgenommenen Nützlichkeit erst rückblickend bilden kann, wirkt die wahrgenommene Benutzungsfreundlichkeit bereits während des Lernprozesses. Somit besteht die Annahme, dass die ELU Varianzen beider Variablen des TAM aufklären könnte, sodass durch die unterschiedlichen zeitlichen Wirkungen besagter Variablen keine gerichteten Zusammenhänge zwischen der ELU und den CLs (ECL/GCL) bestehen.

Weiterhin konnte eine moderat negative Korrelation zwischen der ELU von AR und der ELU von EUM identifiziert werden. Dies ist Ausdruck der Medienpräferenz von Lernenden, wobei oftmals eine Zuneigung zu EUM mit einer Abneigung gegenüber AR einhergeht und vice versa. Etwas abseits der theoretischen Betrachtung zeigt dies die Bedeutung des wechselnden Medieneinsatzes, um die Bedürfnisse aller Lernenden abzudecken. Methodenvielfalt gilt daher übereinstimmend als Qualitätsmerkmal guten Unterrichts (Helmke, 2003).

FF2 Welchen Einfluss hat die Art des Mediums (AR oder EUM) auf die Lernwirksamkeit?

Diese Fragestellung (vgl. Kapitel 4.1) lag der breit angelegten Studie des Alzheimerkoffers mit Teilnehmenden aus den Sekundarstufen I und II zugrunde. Die Beantwortung dieser Frage erfolgt auf Grundlage der identifizierten Zusammenhänge der Strukturgleichungsmodelle, die die Parameter LZ (vgl. Kapitel 6.1.1), CL (vgl. Kapitel 6.2.1), UX (vgl. Kapitel 6.3.1) und ELU (vgl. Kapitel 6.4.1) zusammenführen, sowie der durchgeführten Mittelwertvergleiche.

Den nachfolgend dargestellten Erkenntnissen zum Vergleich von AR und EUM liegen die zuvor erörterten Wirkzusammenhänge und theoretischen Hintergründe (vgl. Kapitel 2.3 bis 2.8) zugrunde. Da die LZ-Unterschiede innerhalb der untersuchten LS mehrheitlich zugunsten von AR ausfielen, kann von einer generellen Lernwirksamkeit des Mediums ausgegangen werden, woraus bereits eine erste Legitimation für den unterrichtspraktischen Einsatz resultiert. Die gefundenen Unterschiede konnten indes nicht vollumfänglich mithilfe der CLT erklärt werden. Dies liegt daran, dass die CLT nicht alle lernrelevanten Faktoren umfasst, wodurch sich nur ein Teil des LZ beschreiben lässt, sodass der GCL – entsprechend dem Strukturgleichungsmodell – diesen nur teilweise aufklärt. Weiterhin wurden in allen LS hohe GCL-Werte ermittelt und dabei wurden keine Unterschiede in Abhängigkeit vom Medium verzeichnet. Somit kann davon ausgegangen werden, dass in allen Untersuchungen dem Lernprozess genügend Arbeitsgedächtnisressourcen gewidmet wurden und die Unterschiede des LZ auf weitere Einflussvariablen zurückzuführen sind.

Weiterhin ergaben sich vereinzelt Unterschiede im CL, ICL und ECL. Dass die Unterschiede im CL stets mit Unterschieden im ICL und/oder ECL einhergingen, stützt die Additivitätshypothese der CLT, da der CL die geistige Anstrengung und damit die Kombination aus ICL und ECL misst (Leppink et al., 2013; Paas, 1992). Weil der ICL und der ECL nur einen indirekten, schwachen Effekt auf den LZ (über den GCL) haben, drückten sich die Unterschiede des ICL und des ECL nicht zwingend im LZ aus. Die niedrigen Werte des ICL und ECL zeigen weiterhin, dass weder die Komplexität der Lerninhalte noch die Gestaltung der Medien (AR und EUM) die Lernenden vor Herausforderungen gestellt hat. Da die CLT jedoch keine Lerntheorie ist (Korbach et al., 2018) und CL-Effekte besonders in Situationen hoher Arbeitsgedächtnisbelastung hervortreten (Magner et al., 2014; Park et al., 2015), kann sie in Fällen, in denen der Lernprozess nicht durch kognitive Ressourcen limitiert war, nur eingeschränkt und nicht allein zur Erklärung herangezogen werden. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass die Studie nicht das Ziel hatte, eine bestehende Lernsituation hoher kognitiver Belastung mittels AR-Einsatz zu reduzieren. Stattdessen wurde die CLT explorativ eingesetzt, um in einem authentischen, unterrichtsnahen Ansatz Anknüpfungspunkte für

eventuell auftretende Lernschwierigkeiten zu identifizieren sowie eine komparative Analyse zwischen AR und EUM zu ermöglichen.

Aufgrund der gefundenen Zusammenhänge zwischen der UX und der CLT bietet sich die Erhebung der UX als relevantes Evaluationstool zur Beurteilung der Lernwirksamkeit von AR-Apps an, da der UEQ einerseits aufgrund des Item-Designs und der vorhandenen Analyse-Tools zeiteffektiv in Studien implementiert werden kann und andererseits über den Benchmark-Vergleich eine Einschätzung zum Nutzen der App zulässt. Es konnten bspw. Defizite in der Dimension der Steuerbarkeit (Gefühl der Kontrolle über das Produkt; Vorhersehbarkeit) identifiziert werden, die womöglich auf Unterbrechungen der AR-Projektion zurückzuführen sind. Die Ursachen waren in aller Regel auf die Trigger (Lichtreflexionen, teilweise Verdeckung) oder auf den Umgang mit der AR-App (Trigger befand sich nicht im Sichtfeld der Kamera) zurückzuführen, wobei der AR-Software zu wenige Referenzpunkte für den Renderprozess zur Verfügung standen. Da die Entwickelnden im Gegensatz zu den Nutzenden mit der Verwendung und der Handhabung der AR-Apps vertraut sind, können solche Hindernisse nur bedingt während der Entwicklung berücksichtigt werden und bedürfen einer externen Testevaluation mit Neulingen. Weiterhin stellt, wie im Strukturgleichungsmodell (vgl. Kapitel 6.3.1) gezeigt, die von der Gehirn-AR-App hervorgerufene Stimulation durch die Verbindungen zum ECL und zum GCL eine wesentliche Komponente für die Lernwirksamkeit dar, da sie durch eine interessante Gestaltung geistige Prozesse der Nutzenden anregt und so die Motivation fördert.

Als weiteres Kriterium zur Beurteilung der Lernwirksamkeit von AR und EUM wurde die ELU analysiert, die im direkten Vergleich eine höhere Bewertung von EUM hervorbrachte. Diese Einschätzung der Lernenden spiegelte sich zwar nicht im LZ wider, jedoch bestehen nachgewiesene Verbindungen zur CLT, zum UX und – bisher durch die von Ifinedo (2018) teilweise belegte Schnittmenge – zum TAM. Dennoch konnten die Gründe für diese Ergebnisse nicht abschließend geklärt werden, da die Bewertung der ELU durch die Probanden (wie in Kapitel 7.4.3 bereits dargelegt) nicht allein auf der durchgeführten Studie beruht, sondern eine generalisierte Einschätzung der Medienpräferenz zum Lernen ist. Somit besteht sicherlich ein Grund in den vorhandenen Fähig- und Fertigkeiten der Lernenden im Umgang mit EUM, die sie sich in ihrer Schullaufbahn angeeignet haben. Diese bereits erlernten und vielfach geübten Arbeitstechniken und Lernstrategien geben Sicherheit im Umgang und können die Medienpräferenz beeinflussen. Somit sollte AR im schulischen Kontext wiederkehrend eingesetzt werden und es bedarf standardisierter sowie didaktisch aufbereiteter App-Konzepte, um den Lernenden den Ausbau ihrer Fähigkeiten in Bezug auf AR zu ermöglichen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass der Einsatz von AR-basierten Lernumgebungen im Vergleich zu EUM in vielen Fällen zu höherem LZ und damit zu besseren schulischen Leistungen führen kann. Jedoch lassen sich diese Unterschiede nicht in allen Fällen durch die Zusammenhänge aus der CLT erklären, sodass weitere Einflussvariablen, bspw. Methodenvielfalt, Motivation, kognitiv aktivierende Aufgabenstellungen und klare Strukturierung der Lehr-Lern-Prozesse, einen Einfluss auf den LZ haben. Dennoch hat die CLT ihre Stärken in der Aufklärung von Situationen hoher Arbeitsgedächtnisbelastung und stellt so ein bedeutsames Analysewerkzeug zur Beantwortung von Instruktionsdesignfragestellungen dar. Durch die Erfassung der UX sind direkt Rückschlüsse auf die Lernwirksamkeit der eingesetzten AR-App möglich (vgl. Kapitel 6.3), da Stärken und Schwächen entlang verschiedener, inhaltlich klar getrennter Dimensionen identifiziert und Probleme ggf. behoben werden können. Als besonders bedeutsame Dimension in Bezug auf das Lernen hat sich hier die Stimulation erwiesen (vgl. Kapitel 6.3.1). Die Erfassung der ELU könnte besonders in länger angelegten Studien ihr Potenzial entfalten, wobei sie Rückschlüsse auf die Entwicklung der jeweiligen Medienpräferenz beim Lernen durch wiederholten Medieneinsatz zulässt.

Besonders vor dem Hintergrund des eingesetzten Kontrollansatzes (EUM-Umsetzung), der auf mehrfach praktisch erprobten Unterrichtsmodulen (Sternheim et al., 2017) beruht und Teil bundesweit evaluierter Fortbildungen für Lehrkräfte ist, sind die positiven Ergebnisse von AR-basierten Lernumgebungen im Biologieunterricht hervorzuheben. Da die Ergebnisse von AR und EUM stets relativ zueinander betrachtet werden, könnten die Potenziale von AR im Vergleich zu unterrichtsalltäglichen Einsatzszenarien von EUM noch stärker hervortreten.

FF3 Welchen Einfluss hat die Art der Steuerung (AR- oder Touch-Gestensteuerung) auf die Lernwirksamkeit?

Diese Fragestellung lag der Hauptstudie *Mitochondrien und Chloroplasten* mit Teilnehmenden aus der Sekundarstufe II zugrunde. Die Beantwortung erfolgt auf Grundlage der identifizierten Zusammenhänge der Strukturgleichungsmodelle, die die Parameter LZ (vgl. Kapitel 6.1.2), CL (vgl. Kapitel 6.2.1), UX (vgl. Kapitel 6.3.1) und ELU (vgl. Kapitel 6.4.1) zusammenführen, sowie der durchgeführten Mittelwertvergleiche.

Bereits anhand der Medienklassifikation nach Abstraktionsgrad nach Spörhase-Eichmann (2015) (vgl. Abb. 3, S. 27) sowie der Ausdifferenzierung verschiedener AR-Merkmale (vgl. Abb. 2, S. 9) zeigt sich, dass AR-basierte Lernumgebungen ein großes Spektrum multimedialer und multimodaler Darstellungsformen bieten, auch in Kombination mit anderen Medien. Da nicht alle Typen von AR für jeden Nutzungskontext infrage kommen, ergeben sich typenspezifische Eigenschaften, aus denen sowohl Vorteile als auch Nachteile gegenüber den

anderen Typen von AR hervorgehen. Eine Eigenschaft der Marker-based AR ist die typische Steuerung, bei der sich durch Trigger-Interaktion aus der Realität heraus die Virtualität beeinflussen und steuern lässt. In Kombination mit der AR-/VR-Steuerung ergibt sich eine einzigartige (AR-typische) Steuerungsmöglichkeit (vgl. Kapitel 2.1.3). Dieser realitätsnahen Steuerung steht die Touch-Gestensteuerung gegenüber, die in einer Vielzahl von mobilen Applikationen und Web-Anwendungen eingesetzt wird. Es lassen sich Elemente auf dem Display bspw. durch Fingerbewegung verschieben, vergrößern (Pinch-to-Zoom-Geste) oder rotieren.

Auf Grundlage der eingangs erörterten Zusammenhänge der Messinstrumente (siehe FF1), der theoretischen Hintergründe (vgl. Kapitel 2) sowie der in den vorangegangenen Kapiteln diskutierten Einzelergebnisse kann die Frage nach dem Einfluss der Art der Steuerung auf die Lernwirksamkeit wie folgt beantwortet werden: Da hinsichtlich des LZ in LS9, nicht aber in LS10 signifikante Unterschiede zugunsten der Touch-Gestensteuerung festgestellt wurden, lassen sich diese Ergebnisse mithilfe der Ergebnisse zum CL, der UX und der ELU sowie mithilfe von Ergebnissen anderer Studien differenzieren. Es wurden im Rahmen der CLT in beiden Untersuchungsszenarien niedrige ICL-/ECL-Werte bei hohen GCL-Werten festgestellt, jedoch ohne dass sich die Steuerungsarten signifikant voneinander unterschieden. Dies lässt den Schluss zu, dass in beiden Szenarien genügend Arbeitsgedächtnisressourcen dem Lernen gewidmet (GCL) wurden und dass die Handhabung des Tablets in Kombination mit der notwendigen Interaktion des Triggers keine übermäßige Belastung (ECL) der AR-Steuerung induzierte. Dies ist ebenfalls konsistent mit den Ergebnissen der UX, da entlang der drei pragmatischen Qualitätskriterien, die Hinweise darauf geben, wie gut Nutzende Aufgaben mit der jeweiligen Steuerungsart erledigen konnten, keine Unterschiede festgestellt wurden. Darüber hinaus bewirkte die AR-Steuerung eine größere allgemeine Zufriedenheit sowie eine höhere Stimulation. Letztere ist gemäß der Strukturgleichungsmodellierung (vgl. Kapitel 6.3.1) und der theoretischen Hintergründe (vgl. Kapitel 2.5) eine lernwirksame Komponente, sodass die interessante Gestaltung der AR-Steuerung womöglich einen positiven Einfluss auf die Motivation der Lernenden hatte.

Ferner liegen in der Originalität beide Steuerungen gleichauf. Die Lernenden empfanden beide Szenarien als gleich innovativ und originell, was ein Indiz für den noch wenig vertrauten Umgang mit Tablets im schulischen Kontext sein kann. Unabhängig von der Steuerungsart wurde die ELU von AR signifikant höher eingestuft als die ELU von EUM. Da die mediale Umsetzung der Touch-Gestensteuerung von den Lernenden womöglich nicht als klassisches Unterrichtsmedium empfunden wurde, kann der Einfluss des Novelty-Effekts (Dunleavy et al., 2009; Kamarainen et al., 2013) auf die Beurteilung nicht ausgeschlossen werden. Somit lassen sich die eingangs skizzierten Ergebnisse des LZ, bei denen sich in LS9, nicht aber in LS10 signifikante Unterschiede zugunsten der Touch-Gestensteuerung zeigten, nicht umfassend

durch weitere Messwerte erklären. Auf Grundlage anderer Studienergebnisse (Dunleavy et al., 2009; Kamarainen et al., 2013) könnte jedoch die AR-Steuerung die Lernenden von der eigentlichen Aufgabenstellung abgelenkt haben. Dass dieser Effekt im späteren LS10 hingegen nicht auftrat, könnte auf der Vertrautheit der Lernenden mit der Aufgabenstellung (aus LS9) beruhen.

Es konnte bisher weder ein positiver noch ein negativer Einfluss der AR-Steuerung auf die Lernwirksamkeit eindeutig belegt werden. Zwar deuten einige Ergebnisse, etwa die zur UX und zur ELU, auf die lernwirksamen Potenziale der AR-Steuerung hin, jedoch zeigen diese keine direkten Auswirkungen auf den CL oder den gemessenen LZ. Zur Aufklärung, ob die gefundenen Unterschiede des LZ in LS9 auf die Art der AR-Steuerung zurückzuführen sind, bedarf es weiterer Untersuchungen mit einem angepassten Studiendesign. Bisher lässt sich kein generell positiverer Effekt der Touch-Steuerung belegen.

FF4 Welchen Einfluss hat die Art des Triggers (3D-QR-Cube oder 2D-Gehirnscheibe) auf die Lernwirksamkeit?

Diese Fragestellung lag der universitätsübergreifenden Detailstudie HoloBrain zugrunde. Die Beantwortung erfolgt auf Grundlage der identifizierten Zusammenhänge der Strukturgleichungsmodelle, die die Parameter LZ, CL (vgl. Kapitel 6.2.1), UX (vgl. Kapitel 6.3.1) und ELU (vgl. Kapitel 6.4.1) zusammenführen, sowie der durchgeführten Mittelwertvergleiche (vgl. Kapitel 6.1.3, 6.2.3, 6.3.3, 6.5.1) unter Einbezug der Immersion als weiteren Faktor zur Charakterisierung der Lernwirksamkeit.

Wie bereits in der vorherigen Fragestellung erläutert, ergeben sich bei der AR typenspezifische Eigenschaften. Im Kontext der Marker-based AR ist daher nicht nur der generelle Einfluss der Steuerung von Forschungsinteresse, sondern auch Besonderheiten, die sich aus den unterschiedlichen Arten von Triggern ergeben. Der 3D-QR-Cube als abstrakter, würfelförmiger Trigger, der in keiner inhaltlichen Beziehung zu der dargebotenen AR-Projektion stand, ermöglichte die unterbrechungsfreie Wiedergabe der AR-Projektion während einer 360°-Betrachtung. Die 2D-Gehirnscheibe steht in einem inhaltlichen und örtlichen Bezug zur AR-Projektion, da sich diese positionsgenau in die AR-Projektion des Hirnmodells einfügte und so einen realitätsnahen Eindruck über die Größe des menschlichen Gehirns vermitteln konnte.

In den Ergebnissen konnten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der jeweils erreichten LZ festgestellt werden. Dennoch ist die Betrachtung weiterer lernrelevanter Testinstrumente sinnvoll, um eine differenziertere Beurteilung der Lernwirksamkeit zu ermöglichen. Die durch die Unterbrechung provozierten lernhinderlichen Eigenschaften der 2D-Gehirnscheibe spiegelten sich – entgegen der Annahme – weder in den

Mittelwertunterschieden des ECL noch in dem GCL wider. Es wurde jedoch ein signifikanter Unterschied im ICL dahingehend festgestellt, dass die Komplexität der Informationen im Untersuchungsszenario der 2D-Gehirnscheibe als höher wahrgenommen wurde. Ein möglicher Erklärungsansatz liegt in den zusätzlichen Informationen der 2D-Gehirnscheibe, etwa die Form und Lage im Gehirn, wodurch eine engere Verknüpfung (i. S. eines Informationsaustausches) zwischen Realität und Virtualität entsteht. Weiterhin konnten zwar keine signifikanten Mittelwertunterschiede hinsichtlich der UX festgestellt werden, ein möglicher Nachweis durch die Erhöhung der Stichprobe ließe jedoch auf Grundlage der größten Mittelwertunterschiede in den Dimensionen Attraktivität, Effizienz und Originalität erwarten.

Ein mögliches lernwirksames Potenzial der 2D-Gehirnscheibe im Vergleich zum 3D-QR-Cube konnte durch die Erfassung der Immersion identifiziert werden. Es wurden auf der höchsten der drei Ebenen der Immersion (totale Immersion) signifikant höhere Bewertungen der 2D-Gehirnscheibe verzeichnet, sodass die *Art des Triggers* die 21 Immersionsfaktoren von Georgiou und Kyza (2017a) ergänzt. Aufgrund der notwendigen Stichprobengröße, zur Durchführung belastbarer Zusammenhangsanalysen, um mögliche Verbindungen zwischen den Stufen der Immersion und dem LZ aufzuklären, konnte diese Beziehung im Rahmen der vorliegenden Detailstudie nicht untersucht werden. Es sollte jedoch in Lernszenarien, die einen hohen Grad an Immersion anstreben, beachtet werden, dass das Erreichen höherer Ebenen der Immersion auch nachteilige Folgen für den Lernprozess haben könnte: Durch die einseitige Fokussierung auf das Medium könnte die Erledigung der eigentlichen Aufgabe in den Hintergrund treten. Es wird zwar ein hoher Grad an Immersion erreicht, der sich aber nachteilig auf die Lernwirksamkeit auswirken kann. Daher sollte auch bei der Konzeption immersiver Lernumgebungen das Primat der Didaktik gelten.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Lernenden mit beiden Triggerarten einen signifikanten LZ erreicht haben, dieser also unabhängig von der Art des Triggers ist. Dennoch scheint die kausale Verknüpfung zwischen der Realität und der Virtualität durch die Art des Triggers Auswirkungen auf den ICL zu haben – bedingt durch die zusätzlichen aus der Realität einwirkenden Informationen. Gleichzeitig ließ sich in diesem Fall eine höhere Bewertung der totalen Immersion feststellen. Dabei bleibt jedoch zu beachten, dass bisher nur ein positiver Zusammenhang zwischen der niedrigsten Stufe der Immersion und dem LZ festgestellt wurde, sodass es zur Aufklärung weiterer Zusammenhänge zusätzlicher Studien bedarf. Auf Grundlage der Ergebnisse der Haupt- und Detailstudie ist es ratsam, die Gestaltung der Trigger bei der Entwicklung zukünftiger AR-Apps stärker zu berücksichtigen, da diese Einfluss auf die UX, die Immersion und den CL haben können.

FF5 Welchen Einfluss hat die mediale Repräsentation (AR-Hirnmodell oder Papiermodell) auf die Lernwirksamkeit?

Neben dem Einfluss der Art des Triggers wurde im Rahmen der Detailstudie der Einfluss der Art der medialen Repräsentation (AR-Hirnmodell oder Papiermodell) auf den CL, die UX und die Immersion untersucht. Die gefundenen Unterschiede des CL beschränkten sich auf den ECL und den GCL, sodass von einer gleichen Inhaltskomplexität (ICL) ausgegangen werden kann. Das hohe Abstraktionsniveau sowie die zweisprachige Beschriftung können als lernhinderliche Eigenschaften des Papiermodells vermutet werden und bieten eine Erklärung für den höheren ECL. Dieser wiederum führt gemäß der CLT und der Strukturgleichungsmodellierung (vgl. Kapitel 6.2.1) zu einer Verringerung des GCL.

Hinsichtlich der UX wurden, mit Ausnahme der Steuerbarkeit, in allen Dimensionen signifikant höhere Bewertungen für das AR-Hirnmodell festgestellt. Die Parität in der Dimension der Steuerbarkeit kann als ein positives Indiz für die AR-Steuerung (vgl. Kapitel 7.3.3) gesehen werden: Demnach löste die Steuerung des AR-Hirnmodells (über Interaktion mit der 2D-Gehirnscheibe und mit dem 3D-QR-Cube) bei den Studierenden das gleiche Gefühl der Kontrolle aus wie das haptische, real vorhandene Papiermodell. Weiterhin zeigten sich in allen drei Ebenen der Immersion signifikante Unterschiede zugunsten des AR-Hirnmodells. Aufgrund des Studiendesigns können zwar keine Rückschlüsse auf den LZ gezogen werden, jedoch konnte über die Reliabilitätsanalyse gezeigt werden, dass der ARI-Fragebogen mittels adäquater Itemformulierung auch zuverlässig zur Erfassung der Immersion in Nicht-AR-basierten Untersuchungsszenarien eingesetzt werden kann. Es lassen sich aus den Ergebnissen aufgrund der geringen Stichprobe keine belastbaren Belege für die Lernwirksamkeit des AR-Hirnmodells ableiten, jedoch sind die Resultate in Bezug auf die CLT, die UX und die Immersion vielversprechend für zukünftige Forschungen und geben für weitere Untersuchungen eine klare Richtung vor.

9 Ausblick

Die vorliegende Dissertation ermöglichte anhand AR-typischer Merkmale eine mehrdimensionale Betrachtung der Lernwirksamkeit von AR in authentischen biologischen Lehr-Lern-Szenarien. Es konnten theoretische Zusammenhänge innerhalb und über die Grenzen einzelner Messinstrumente zur Erfassung der Lernwirksamkeit hinaus aufgezeigt werden. Diese Wirkzusammenhänge konnten als Grundlage zur Beschreibung der Lernwirksamkeit von AR-basierten Lernszenarien genutzt werden. Im Folgenden werden zunächst weitere Fragestellungen und zukünftige Forschungsfelder zur Untersuchung von AR-basierten Lernumgebungen aufgezeigt und anschließend wird ein Ausblick auf zukünftige Untersuchungen der Wirkzusammenhänge zwischen der CLT, der UX, der ELU und der Immersion gegeben.

In der komparativen Analyse der Lernwirksamkeit von AR und EUM in authentischen Unterrichtsszenarien machte insbesondere die Auswahl des mehrfach erprobten und evaluierten Kontrollansatzes das Auftreten möglicher CL-Effekte unwahrscheinlich, da diese Effekte nach Magner et al. (2014) und Park et al. (2015) besonders in Fällen hoher Arbeitsgedächtnisbelastung auftreten. Es ließ sich zwar die Frage beantworten, ob AR-basierte Lernumgebungen lernwirksam sind, jedoch bedarf es zur Beantwortung der weiteren Fragestellung, ob sich mithilfe von AR der CL senken lässt, einer anderen Herangehensweise. Da nach Moreno und Park (2010) kein Kriterium existiert, mit dem von vornherein bestimmt werden kann, wann eine Aufgabe komplex ist und welche Auswirkungen sie auf den CL hat, müssten zur Bearbeitung der Fragestellung Lernszenarien mit einem hohen CL sowie mit Auswirkungen auf den LZ identifiziert und charakterisiert werden. Können diese nachteiligen Auswirkungen auf den LZ auf einen hohen ECL zurückgeführt werden, könnte in einem nächsten Schritt, und im besten Fall unter Berücksichtigung der in dieser Dissertation gewonnenen Erkenntnisse, eine AR-App zur möglichen Reduktion des CL entwickelt und untersucht werden.

Forschende, die das Ziel haben, konkrete Gestaltungsrichtlinien zur Konzeption lernwirksamer AR-basierter Lernumgebungen zu formulieren, könnten ähnlich wie Georgiou und Kyza (2018) in einem Design-based Approach Immersionsfaktoren identifizieren, auf Grundlage theoretischer Überlegungen weitere Merkmale von AR-basierten Lernumgebungen formulieren oder die in dieser Arbeit beschriebenen Merkmale weiter untersuchen. In einem breiteren Kontext würden diese Erkenntnisse dazu beitragen, für bestimmte AR-Einsatzszenarien die geeignete Form der AR zu wählen, sodass die für die Lerninhalte passende AR-Kategorie ermittelt wird und durch Erkenntnisse der UX auf die Bedürfnisse der Lernenden eingegangen werden kann. Ebenso bieten sich zur weiteren Validierung des ARI-

Fragebogens sich Studien mit einer größeren Stichprobe, Erhebungen in unterschiedlichen Kontexten und die Bestätigung durch eine konfirmatorische Faktorenanalyse an.

Ausgehend davon wurde der Fokus in dieser Arbeit aufgrund der möglichen kausalen Verschränkung zwischen Realität und Virtualität auf einzelne Merkmale der Marker-based AR gelegt (z. B. Trigger- und Steuerungsart). Um zu prüfen, inwiefern sich die gewonnenen Erkenntnisse jedoch auf die Lernwirksamkeit der immer häufiger anzutreffenden Markerless AR übertragen lassen, bedarf es zusätzlicher Studien und der Aufklärung weiterer möglicher Merkmale. In diesem Zusammenhang ergeben sich aufgrund der hybriden Steuerungsmöglichkeit, die sowohl die Touch-Gestensteuerung (Positionierung, Skalierung und Rotation der 3D-Modelle im Realraum) als auch Teile der AR-Steuerung (Fokussierung bestimmter Details durch Heran- bzw. Wegführung des Handheld Devices ähnlich einer Lupe, 360°-Betrachtung durch Bewegen des Handheld Devices um das 3D-Modell herum) beinhaltet zahlreiche Fragestellungen: Wie beeinflusst die hybride Steuerung die UX? Welche Auswirkungen hat die hybride Steuerung auf den ECL? Gibt es Präferenzen der Probanden hinsichtlich der Steuerungsmöglichkeiten?

Neben der Erforschung AR-typischer Merkmale hinsichtlich ihrer Lernwirksamkeit liefert diese Arbeit weitere Erkenntnisse für die Weiterentwicklung bestehender Theorien und theorieübergreifender Zusammenhänge zur Erfassung der Lernwirksamkeit. Durch die Überprüfung der theoretischen Zusammenhänge zwischen der CLT und dem LZ konnten theoriebildende Implikationen zur Messung des CL aufgezeigt werden. Darüber hinaus konnte der Einfluss weiterer theoretischer Konstrukte (wie der UX, der ELU und der Immersion) auf die CLT offengelegt werden.

Vor dem Hintergrund CLT-interner Zusammenhänge lassen sich zwei zentrale zukünftige Forschungsschwerpunkte zur Messung des CLT herausstellen: (1) Die Frage nach der theoretischen Trennung zwischen ICL und ECL – entsprechend der bisherigen Annahmen der CLT – bleibt offen, da sich diese beiden Loads weder in den vorliegenden Studien noch in vergleichbaren Arbeiten (Becker et al., 2020; Hadie & Yusoff, 2016; Leppink et al., 2013; Thees et al., 2021; Zukić et al., 2016) empirisch klar voneinander trennen lassen. (2) Während bei der Revision der CLT (Kalyuga, 2011; Sweller, 2011; Sweller et al., 2011a) nur noch in zwei statt in drei Faktoren des CL differenziert wird, fehlt es hierzu weiter an empirischer Unterfütterung sowie an geeigneten Messinstrumenten. In diesem Kontext stellen sich weiter die Fragen, welche Einschränkungen sich durch die Revision der CLT und welche Vorteile sich durch die Trennung von GR und ER (Sweller et al., 2011a) ergeben könnten. Da der Fokus dieser Arbeit nicht primär auf der Erforschung der CLT zur Formulierung theoriebildender Erkenntnisse lag, sondern das vorhandene Messinstrument zur Aufklärung der Lernwirksamkeit in authentischen Unterrichtsszenarien eingesetzt und evaluiert wurde,

werden die zuvor genannten Punkte nur kurz erörtert, um Denkanstöße zur weiteren Untersuchung der CLT zu geben:

Sowohl Punkt (1) als auch Punkt (2) zielen auf eine differenzierte Messung des CL ab, um zukünftige Instruktionsdesignfragestellungen besser beantworten zu können und relevante Beiträge zur Weiterentwicklung der CLT im Hinblick auf das zwei- oder dreifaktorielle Modell zu liefern. Die Entwicklung eines Messinstruments zur Differenzierung zwischen dem ICL und dem ECL stellt eine Grundlage für weitere Forschungen dar (Leppink, 2017), da so theoretische Implikationen abgeleitet werden können und dieses Modell Rückschlüsse auf die Ursachen der kognitiven Belastung zur Beantwortung von Instruktionsdesignfragestellungen zulässt. Durch die weitere Differenzierung in die genutzten Arbeitsgedächtnisressourcen GR und ER könnten zusätzlich Hinweise darauf gegeben werden, ob ein Lernprozess stattgefunden hat bzw. welche Arbeitsgedächtnisressourcen dabei besonders aktiviert wurden. Die kognitive Belastung, die durch den Lerninhalt (ICL) und die Gestaltung der Lernmaterialien (ECL) induziert wird, lässt allein noch keine Rückschlüsse auf den tatsächlichen Lernprozess zu, da unklar ist, ob die Lernenden auch bereit waren, dem Lernvorgang Arbeitsgedächtnisressourcen zu widmen (Sweller et al., 2011b). Darüber hinaus könnte so nicht nur das Vorwissen der Lernenden in Bezug auf den Lerngegenstand als Einfluss auf den ICL berücksichtigt werden, sondern auch die Fähig- und Fertigkeiten der Lernenden im Umgang mit Lehrmaterialien und Arbeitstechniken, die einen Einfluss auf den ECL haben könnten. Ferner könnte so ein Kritikpunkt von Moreno (2010) berücksichtigt werden, sodass neben kognitiven Faktoren auch affektive und motivationale Aspekte des Lernens Eingang in die CLT finden.

Durch die Berücksichtigung zusätzlicher Aspekte des Lernens und deren Verknüpfung mit der CLT konnten weitere Ansatzpunkte für zukünftige Studien gewonnen werden. Es zeigte sich besonders durch die enge Verknüpfung der UEQ-Dimension Stimulation mit der CLT die Bedeutung der Stimulation zur Beurteilung der Lernwirksamkeit von Medien. Um zu klären, ob dieser und die weiteren theorieübergreifenden Zusammenhänge auch in anderen Kontexten gültig sind, ist ein systematischer Einsatz der Messinstrumente mit deren Verknüpfung in zukünftigen Studien nötig, sodass die in dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse repliziert und validiert werden können. Dabei sollte es besonders im Fokus stehen, die von Schrepp (2018b) formulierten Zusammenhänge zwischen der Stimulation und der Motivation („Bei Stimulation geht es [...] darum, dass die Gestaltung des Produkts interessant, geistig anregend und damit motivierend ist“ (S. 64)) sowie zwischen der Stimulation und der Immersion („Immersion ist [...] die auf das maximale Maß gesteigerte Stimulation“ (S.67)) empirisch zu belegen. Dazu bedarf es ebenfalls Erhebungen in unterschiedlichen inhaltlichen Kontexten und einer Vergrößerung der Stichprobe zur Anwendung statistisch aussagekräftiger Verfahren.

Ferner gilt es, die Einsatzszenarien des entwickelten Messinstruments der ELU zu erweitern. Aufgrund der Nähe zum TAM, das Aussagen über den Grund der Nutzung einer Technologie zulässt, könnte die ELU, ähnlich wie in den Studien von B. Cheng et al. (2011), I.-F. Liu et al. (2010) und Lowe et al. (2013), dieses um einen zusätzlichen (externen) Faktor erweitern. Während die ELU als Instrument zur Einschätzung des eigenen Lernprozesses in Abhängigkeit von bestimmten Medien konzipiert wurde, wäre auch eine Erweiterung im Einsatz bei Lehrenden denkbar. Es ergäben sich bspw. folgende Einsatzszenarien: (1) Anstatt die ELU von Lernenden zu erfassen, könnte die ELU von Lehrenden erfasst werden, was einen direkten Vergleich beider Gruppen ermöglichen würde. Alternativ (2) könnten Lehrkräfte auf Grundlage ihrer mediendidaktischen Expertise eine Einschätzung zur ELU (bei Lernenden) von AR geben. Besonders in Fällen, in denen die ELU eines Mediums der Lernenden von der externen Einschätzung der ELU (2) desselben Mediums abweicht, bietet Anknüpfungspunkte für weitere Fragestellungen.

Zum Zeitpunkt dieser Dissertation konnten keine Studien identifiziert werden, in denen der Fokus auf der Erforschung bestimmter AR-typischer Merkmale (insbesondere der Marker-based AR) lag. Die Ergebnisse dieser Arbeit legen jedoch nahe, dass besonders im Hinblick auf die AR Steuerung und die Art des Triggers Einflüsse auf die UX, die ELU sowie die Immersion bestehen. Aufgrund der vielseitigen Merkmale von AR, sind weitere Studien nötig, in denen bereits in der Planungsphase AR-typische Merkmale bedacht werden und die somit einer klaren Kategorisierung der eingesetzten AR folgen, sodass induktive Ableitungen studienübergreifender Ergebnisse hinsichtlich der jeweiligen Merkmale von AR möglich sind.

10 Literaturverzeichnis

- Adams, E. (2014). *Fundamentals of Game Design* (3. Aufl.). New Riders.
- Agrawal, S., Simon, A., Bech, S., Bærentsen, K. & Forchhammer, S. (2019). Defining Immersion: Literature Review and Implications for Research on Immersive Audiovisual Experiences. *Journal of the Audio Engineering Society*, 68(6), 404–417.
- Akçayır, M. & Akçayır, G. (2017). Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational Research Review*, 20, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002>
- Alberts, B. (2014). *Lehrbuch der Molekularen Zellbiologie*. Wiley-VCH-Lehrbuchkollektion 1. John Wiley and Sons. <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/3527683267>
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K. & Walter, P. (2017). *Molekularbiologie der Zelle* (B. Häcker, Übers.) (U. Schäfer, Hg.) (6. Aufl.). Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527698448>
- Alqurashi, E. (2019). Predicting student satisfaction and perceived learning within online learning environments. *Distance Education*, 40(1), 133–148. <https://doi.org/10.1080/01587919.2018.1553562>
- Altmeyer, K., Kapp, S., Thees, M., Malone, S., Kuhn, J. & Brünken, R. (2020). The use of augmented reality to foster conceptual knowledge acquisition in STEM laboratory courses - Theoretical background and empirical results. *British Journal of Educational Technology*, 51(3), 611–628. <https://doi.org/10.1111/bjet.12900>
- Amatriain, X., Höllerer, T., Kuchera, J. & Pope, S. (2007). Immersive Audio and Music in the Allosphere. *International Computer Music Conference*.
- Ateş, C., Kaymaz, Ö., Kale, H. E. & Tekindal, M. A. (2019). Comparison of Test Statistics of Nonnormal and Unbalanced Samples for Multivariate Analysis of Variance in terms of Type-I Error Rates. *Computational and mathematical methods in medicine*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2173638>
- Auganix. (2023, 23. Februar). *Aurasma*. <https://www.auganix.org/hud/aurasma/>
- Ayres, P. (2006). Using subjective measures to detect variations of intrinsic cognitive load within problems. *Learning and Instruction*, 16(5), 389–400. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.09.001>
- Ayres, P. (2018). Subjective Measures of Cognitive Load: What Can They Reliably Measure? In R. Z. Zheng (Hrsg.), *Cognitive Load Measurement and Application: A Theoretical Framework for Meaningful Research and Practice* (S. 9–28). Routledge.
- Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355–385.

- Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R., Graf, S. & Kinshuk (2014). Augmented Reality Trends in Education: A Systematic Review of Research and Applications. *Journal of Educational Technology & Society*, 17(4), 133–149.
<http://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.17.4.133>
- Baños, R. M., Botella, C., Alcañiz, M., Liaño, V., Guerrero, B. & Rey, B. (2004). Immersion and emotion: their impact on the sense of presence. *Cyberpsychology & Behavior*, 7(6), 734–741. <https://doi.org/10.1089/cpb.2004.7.734>
- Beck, H., Anastasiadou, S. & Meyer zu Reckendorf, C. (2016). *Faszinierendes Gehirn*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47092-3>
- Becker, S., Klein, P., Gößling, A. & Kuhn, J. (2020). Investigating Dynamic Visualizations of Multiple Representations Using Mobile Video Analysis in Physics Lessons. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 26(1), 123–142.
<https://doi.org/10.1007/s40573-020-00116-9>
- Berck, K.-H. & Graf, D. (2003). *Biologiedidaktik von A bis Z: Wörterbuch mit 1000 Begriffen*. Quelle & Meyer.
- Berck, K.-H. & Graf, D. (2010). *Biologiedidaktik: Grundlagen und Methoden* (4. Aufl.). Quelle & Meyer. https://naturwissenschaften.bildung-rp.de/fileadmin/user_upload/naturwissenschaften.bildung-rp.de/_Alt/pdf-download/Lehrplaene_Endversion_online.pdf
- Biocca, F. & Delaney, B. (1995). Immersive Virtual Reality Technology. In F. Biocca (Hrsg.), *Communication in the Age of Virtual Reality*. Erlbaum.
- Bloom, B. S. (1972). *Taxonomie von Lernzielen im kognitiven Bereich* (4. Aufl.). Beltz-Studienbuch: Bd. 35. Beltz.
- Bortz, J. & Schuster, C. (2016). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler: Extras online* (7. Aufl.). Springer-Lehrbuch. Springer.
- Bressler, D. M. & Bodzin, A. M. (2013). A mixed methods assessment of students' flow experiences during a mobile augmented reality science game. *Journal of Computer Assisted Learning*, 29(6), 505–517. <https://doi.org/10.1111/jcal.12008>
- Brown, E. & Cairns, P. (2004). A grounded investigation of game immersion. In E. Dykstra-Erickson (Hrsg.), *CHI '04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (S. 1297). ACM. <https://doi.org/10.1145/985921.986048>
- Bystrom, K.-E., Barfield, W. & Hendrix, C. (1999). A Conceptual Model of the Sense of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2), 241–244. <https://doi.org/10.1162/105474699566107>
- Cabero-Almenara, J., Barroso-Osuna, J., Llorente-Cejudo, C. & Del Fernández Martínez, M. M. (2019). Educational Uses of Augmented Reality (AR): Experiences in

- Educational Science. *Sustainability*, 11(18), 4990.
<https://doi.org/10.3390/su11184990>
- Cai, S., Chiang, F.-K. & Wang, X. (2013). Using the Augmented Reality 3D Technique for a Convex Imaging Experiment in a Physics Course. *International Journal of Engineering Education*, 29(4), 856–865.
- Campbell, N. A., Reece, J. B., Kratochwil, A. & Lazar, T. (2012). *Biologie* (8. Aufl.). Pearson Studium - Biologie. Pearson Studium. <http://lib.myilibrary.com/detail.asp?id=404891>
- Chalmers, P. A. (2003). The role of cognitive theory in human–computer interface. *Computers in Human Behavior*, 19(5), 593–607. [https://doi.org/10.1016/S0747-5632\(02\)00086-9](https://doi.org/10.1016/S0747-5632(02)00086-9)
- Chandler, P. (2018). Foreword. In R. Z. Zheng (Hrsg.), *Cognitive Load Measurement and Application: A Theoretical Framework for Meaningful Research and Practice* (S. viii–x). Routledge.
- Chandler, P. & Sweller, J. (1991). Cognitive Load Theory and the Format of Instruction. *Cognition and Instruction*, 8(4), 293–332. https://doi.org/10.1207/s1532690xci0804_2
- Cheng, B., Wang, M., Yang, S. J., Kinshuk & Peng, J. (2011). Acceptance of competency-based workplace e-learning systems: Effects of individual and peer learning support. *Computers & Education*, 57(1), 1317–1333.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.01.018>
- Cheng, K.-H. (2015). Reading an augmented reality book: An exploration of learners' cognitive load, motivation, and attitudes. *Australasian Journal of Educational Technology*, 33(4). <https://doi.org/10.14742/ajet.2820>
- Cheng, K.-H. & Tsai, C.-C. (2013). Affordances of Augmented Reality in Science Learning: Suggestions for Future Research. *Journal of Science Education and Technology*, 22(4), 449–462. <https://doi.org/10.1007/s10956-012-9405-9>
- Cheng, M. T., She, H. C. & Annetta, L. A. (2015). Game immersion experience: Its hierarchical structure and impact on game-based science learning. *Journal of Computer Assisted Learning*, 31(3), 232–253. <https://doi.org/10.1111/jcal.12066>
- Cheng, M.-T., Lin, Y.-W., She, H.-C. & Kuo, P.-C. (2017). Is immersion of any value? Whether, and to what extent, game immersion experience during serious gaming affects science learning. *British Journal of Educational Technology*, 48(2), 246–263.
<https://doi.org/10.1111/bjet.12386>
- Chiang, T. H. C., Yang, S. J. H. & Hwang, G.-J. (2014). An Augmented Reality-based Mobile Learning System to Improve Students' Learning Achievements and Motivations in Natural Science Inquiry Activities. *Journal of Educational Technology & Society*, 17(4), 352–365.

- Cierniak, G., Scheiter, K. & Gerjets, P. (2009). Explaining the split-attention effect: Is the reduction of extraneous cognitive load accompanied by an increase in germane cognitive load? *Computers in Human Behavior*, 25(2), 315–324.
<https://doi.org/10.1016/j.chb.2008.12.020>
- Cohen, J [Jakob]. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. Aufl.). L. Erlbaum Associates.
- Craig, A. B. (2013a). Augmented Reality Hardware. In A. B. Craig (Hrsg.), *Understanding augmented reality: Concepts and applications* (S. 69–124). Morgan Kaufmann.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-240-82408-6.00003-5>
- Craig, A. B. (2013b). Augmented Reality Software. In A. B. Craig (Hrsg.), *Understanding augmented reality: Concepts and applications* (S. 125–149). Morgan Kaufmann.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-240-82408-6.00004-7>
- Cranach, M. von & Bangerter, A. (2000). Wissen und Handeln in systemischer Perspektive: Ein komplexes Problem. In H. Mandl & J. Gerstenmaier (Hrsg.), *Die Kluft zwischen Wissen und Handeln: Empirische und theoretische Lösungsansätze*. Hogrefe Verlag für Psychologie.
- Dalgarno, B. & Lee, M. J. W. (2010). What are the learning affordances of 3-D virtual environments? *British Journal of Educational Technology*, 41(1), 10–32.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8535.2009.01038.x>
- Dattalo, P. (2013). *Analysis of Multiple Dependent Variables*. Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199773596.001.0001>
- Davis, F. D., Bagozzi, R. P. & Warshaw, P. R. (1989). User Acceptance of Computer Technology: A Comparison of Two Theoretical Models. *Management Science*, 35(8), 982–1003. <https://doi.org/10.1287/mnsc.35.8.982>
- Dede, C. (2009). Immersive Interfaces for Engagement and Learning. *Science*, 323(5910), 66–69. <https://doi.org/10.1126/science.1167311>
- Dhir, A. & Al-kahtani, M. (2013). A Case Study on User Experience (UX) Evaluation of Mobile Augmented Reality Prototypes. *Journal of Universal Computer Science*, 19(8), 1175–1196.
- Di Serio, Á., Ibáñez, M. B. & Kloos, C. D. (2013). Impact of an augmented reality system on students' motivation for a visual art course. *Computers & Education*, 68, 586–596.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.03.002>
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2018-11-00). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte* (DIN ISO 9241-11:2018). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2020-10-00). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Interaktionsprinzipien* (DIN ISO 9241-110:2020). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2020-03-00). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme* (DIN ISO 9241-210:2019). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Drimalla, H. (2011). *Anatomie: Das Kleinhirn*.
<https://www.dasgehirn.info/grundlagen/anatomie/das-kleinhirn>
- Dunleavy, M., Dede, C. & Mitchell, R. (2009). Affordances and Limitations of Immersive Participatory Augmented Reality Simulations for Teaching and Learning. *Journal of Science Education and Technology*, 18(1), 7–22. <https://doi.org/10.1007/s10956-008-9119-1>
- Ermí, L. & Mäyrä, F. (2005). Fundamental Components of the Gameplay Experience: Analysing Immersion. In C. Hill (Vorsitz), *DiGRA Conference*.
- Faßler, M. (1997). *Was ist Kommunikation? UTB für Wissenschaft Uni-Taschenbücher Soziologie, Medienwissenschaften: Bd. 1960*. Fink.
- Finch, H. (2005). Comparison of the Performance of Nonparametric and Parametric MANOVA Test Statistics when Assumptions Are Violated. *Methodology*, 1(1), 27–38. <https://doi.org/10.1027/1614-1881.1.1.27>
- Fu, L. P., Landay, J., Nebeling, M., Xu, Y. & Zhao, C. (2018). Redefining Natural User Interface. In R. Mandryk, M. Hancock, M. Perry & A. Cox (Hrsg.), *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 1–3). ACM. <https://doi.org/10.1145/3170427.3190649>
- Ganten, D., Ruckpaul, K., Ruiz-Torres, A. & Bähr, M. (2004). *Molekularmedizinische Grundlagen von altersspezifischen Erkrankungen. Molekulare Medizin*. Springer.
- García-Peñalvo, F. J. & Moreno, L. (2019). Special issue on exploring new Natural User Experiences. *Universal Access in the Information Society*, 18(1), 1–2. <https://doi.org/10.1007/s10209-017-0578-0>
- Garzón, J. & Acevedo, J. (2019). Meta-analysis of the impact of Augmented Reality on students' learning gains. *Educational Research Review*, 27, 244–260. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.04.001>
- Geiger, T. (2021). *Head-up-Displays im Auto: Hey! Augen auf die Straße!*
<https://www.spiegel.de/auto/head-up-display-im-auto-innovationen-auf-der-frontscheibe-a-0d07d31b-2f93-40fd-87fe-e57931923a71>
- Geis, T. (2010). *Usability und User Experience unterscheiden*. ProContext Consulting GmbH. <https://www.procontext.de/aktuelles/2010/03/usability-und-user-experience-unterscheiden.html>

- Georgiou, Y. & Kyza, E. A. (2017a). A design-based approach to augmented reality location-based activities. In F. Loizides, G. Papadopoulos & N. Souleles (Hrsg.), *Proceedings of the 16th World Conference on Mobile and Contextual Learning - mLearn 2017* (S. 1–8). ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3136907.3136926>
- Georgiou, Y. & Kyza, E. A. (2017b). The development and validation of the ARI questionnaire: An instrument for measuring immersion in location-based augmented reality settings. *International Journal of Human-Computer Studies*, *98*, 24–37.
- Georgiou, Y. & Kyza, E. A. (2018). Relations between student motivation, immersion and learning outcomes in location-based augmented reality settings. *Computers in Human Behavior*, *89*, 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.08.011>
- Georgiou, Y. & Kyza, E. A. (2021). Bridging narrative and locality in mobile-based augmented reality educational activities: Effects of semantic coupling on students' immersion and learning gains. *International Journal of Human-Computer Studies*, *145*, 102546. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2020.102546>
- Google Developers. (2020, 6. November). *ARCore: Fundamental concepts*. <https://developers.google.com/ar/discover/concepts>
- Greeno, J., Collins, A. & Resnick, L. (1996). Cognition and Learning. In D. Berliner & R. Calfee (Hrsg.), *Handbook of Educational Psychology* (S. 15–46). Macmillan.
- Grüner, G. (1967). Die didaktische Reduktion als Kernstück der Didaktik. In Gesellschaft Erziehung und Wissenschaft (Hrsg.), *Die deutsche Schule*. Waxmann.
- Gudjons, H. & Traub, S. (2020). *Pädagogisches Grundwissen: Überblick - Kompendium - Studienbuch* (13. Aufl.). *utb: 3092. Pädagogik*. Verlag Julius Klinkhardt.
- Hacke, W. (2016). *Neurologie* (14. Aufl.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46892-0>
- Hadie, S. N. & Yusoff, M. S. (2016). Assessing the validity of the cognitive load scale in a problem-based learning setting. *Journal of Taibah University Medical Sciences*, *11*(3), 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.jtumed.2016.04.001>
- Hake, R. R. (1998). Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, *66*(1), 64–74. <https://doi.org/10.1119/1.18809>
- Halbach, U. (1977). Modelle in der Biologie. In G. Schäfer, G. Trommer & K. Wenk (Hrsg.), *Denken in Modellen: Leitthemen Beitrag zu Naturwissenschaften*. Westermann.
- Hanafi, H. F., Said, C. S., Wahab, M. H. & Samsuddin, K. (2017). Improving Students' Motivation in Learning ICT Course With the Use of A Mobile Augmented Reality Learning Environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *226*, 12114. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/226/1/012114>

- Harandi, S. R. (2015). Effects of e-learning on Students' Motivation. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 181, 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.04.905>
- Hassenzahl, M. (2001). The Effect of Perceived Hedonic Quality on Product Appealingness. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 13(4), 481–499. https://doi.org/10.1207/S15327590IJHC1304_07
- Hassenzahl, M., Burmester, M. & Koller, F. (2003). AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In G. Szwillus & J. Ziegler (Hrsg.), *Berichte des German Chapter of the ACM. Mensch & Computer 2003* (Bd. 57, S. 187–196). Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-322-80058-9_19
- Haugtvedt, C. P. & Liu, K [Kaiya]. (2010). Order Effects. In N. J. J. Salkind (Hrsg.), *Encyclopedia of Research Design*. SAGE Publications. <https://doi.org/10.4135/9781412961288.n293>
- Helmke, A. (2003). *Unterrichtsqualität erfassen, bewerten, verbessern. Schulisches Qualitätsmanagement*. Kallmeyer.
- Hillmayr, D., Reinhold, F., Ziernwald, L. & Reiss, K. (2017). *Digitale Medien im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht der Sekundarstufe: Einsatzmöglichkeiten, Umsetzung und Wirksamkeit*. Waxmann.
- Hoffmann, C. (2021, 26. Mai). *Alzheimerkoffer.de: Das Konzept*. <http://alzheimerkoffer.de/>
- Hollender, N., Hofmann, C., Deneke, M. & Schmitz, B. (2010). Integrating cognitive load theory and concepts of human–computer interaction. *Computers in Human Behavior*, 26(6), 1278–1288. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2010.05.031>
- Hopp, T. & Gangadharbatla, H. (2016). Novelty Effects in Augmented Reality Advertising Environments: The Influence of Exposure Time and Self-Efficacy. *Journal of Current Issues & Research in Advertising*, 37(2), 113–130. <https://doi.org/10.1080/10641734.2016.1171179>
- Hornecker, E. (2005). A Design Theme for Tangible Interaction: Embodied Facilitation. In H. Gellersen, M. Beaudouin-Lafon, W. Mackay & K. Schmidt (Hrsg.), *ECSCW 2005: Proceedings of the Ninth European Conference on Computer-Supported Cooperative Work* (S. 23–43). Springer.
- Hu, L. & Bentler, P. M. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 6(1), 1–55. <https://doi.org/10.1080/10705519909540118>
- Huber, F., Herrmann, A., Meyer, F., Vogel, J. & Vollhardt, K. (2007). *Kausalmodellierung mit Partial Least Squares: Eine anwendungsorientierte Einführung*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9328-1>

- Ibáñez, M. B., Uriarte Portillo, A., Zatarain Cabada, R. & Barrón, M. L. (2020). Impact of augmented reality technology on academic achievement and motivation of students from public and private Mexican schools. A case study in a middle-school geometry course. *Computers & Education*, 145, 103734.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103734>
- Ibáñez, M.-B. & Delgado-Kloos, C. (2018). Augmented reality for STEM learning: A systematic review. *Computers & Education*, 123, 109–123.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.05.002>
- Ifinedo, P. (2018). Roles of perceived fit and perceived individual learning support in students' weblogs continuance usage intention. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 15(1), 183. <https://doi.org/10.1186/s41239-018-0092-3>
- Igo, R. P. (2010). Influential Data Points. In N. J. Salkind (Hrsg.), *Encyclopedia of research design* (Bd. 2, S. 600–602). Sage.
- Ishii, H. & Ullmer, B. (1997). Tangible bits. In S. Pemberton (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '97* (S. 234–241). ACM Press. <https://doi.org/10.1145/258549.258715>
- Jakobs, S., Stoldt, S. & Ilgen, P. (2019). Mitochondria in the spotlight. *MPIbpc News*, 25(8).
- JARVISH. (2020, 10. Januar). *Home*. <https://www.jarvish.com/>
- Jennett, C., Cox, A. L., Cairns, P., Dhoparee, S., Epps, A., Tijs, T. & Walton, A. (2008). Measuring and defining the experience of immersion in games. *International Journal of Human-Computer Studies*, 66(9), 641–661.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2008.04.004>
- Johnson, L., Levine, A., Smith, R. & Stone, S. (2010). *The 2010 Horizon Report*. The New Media Consortium; Boulder, CO; EDUCAUSE Learning Initiative.
- Juan, M.-C., Alexandrescu, L., Folguera, F. & García, I. (2016). A mobile augmented reality system for the learning of dental morphology. *Digital Education Review*, 234–247.
- Kähler, W.-M. (2004). *Statistische Datenanalyse: Verfahren verstehen und mit SPSS gekonnt einsetzen* (3. Aufl.). Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-11498-7>
- Kalyuga, S. (2011). Cognitive Load Theory: How Many Types of Load Does It Really Need? *Educational Psychology Review*, 23(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9150-7>
- Kalyuga, S., Ayres, P., Chandler, P. & Sweller, J. (2003). The Expertise Reversal Effect. *Educational Psychologist*, 38(1), 23–31. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_4
- Kalyuga, S., Rikers, R. & Paas, F. (2012). Educational Implications of Expertise Reversal Effects in Learning and Performance of Complex Cognitive and Sensorimotor Skills.

- Educational Psychology Review*, 24(2), 313–337. <https://doi.org/10.1007/s10648-012-9195-x>
- Kamarainen, A. M., Metcalf, S., Grotzer, T., Browne, A., Mazzuca, D., Tutwiler, M. S. & Dede, C. (2013). EcoMOBILE: Integrating augmented reality and probeware with environmental education field trips. *Computers & Education*, 68, 545–556. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.02.018>
- Kass, R. A. & Tinsley, H. E. A. (1979). Factor Analysis. *Journal of Leisure Research*, 11(2), 120–138. <https://doi.org/10.1080/00222216.1979.11969385>
- Killermann, W., Hiering, P. & Starosta, B. (2011). *Biologieunterricht heute: Eine moderne Fachdidaktik* (14. Aufl.). Auer.
- Kirschner, F., Paas, F. & Kirschner, P. A. (2009). A Cognitive Load Approach to Collaborative Learning: United Brains for Complex Tasks. *Educational Psychology Review*, 21(1), 31–42. <https://doi.org/10.1007/s10648-008-9095-2>
- Kiryakova, G., Angelova, N. & Yordanova, L. (2018). The Potential of Augmented Reality to Transform Education into Smart Education. *TEM Journal*, 7(3), 556–565. <https://doi.org/10.18421/TEM73-11>
- Klafki, W. (1964). Didaktische Analyse als Kern der Unterrichtsvorbereitung. In A. Blumenthal & H. Roth (Hrsg.), *Grundlegende Aufsätze aus der Zeitschrift: Die Deutsche Schule, Auswahl 1* (S. 5–34). Schroedel.
- Klepsch, M. & Seufert, T. (2020). Understanding instructional design effects by differentiated measurement of intrinsic, extraneous, and germane cognitive load. *Instructional Science*, 48(1), 45–77. <https://doi.org/10.1007/s11251-020-09502-9>
- KMK - Sekretariat der ständigen Konferenz der Kultusminister in der Bundesrepublik Deutschland (2004). Einheitliche Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Biologie: Beschluss vom 01.12.1989 i.d.F. vom 05.02.2004.
- KMK - Sekretariat der ständigen Konferenz der Kultusminister in der Bundesrepublik Deutschland (2016). Bildung in der digitalen Welt: Strategie der Kultusministerkonferenz.
- KMK - Sekretariat der ständigen Konferenz der Kultusminister in der Bundesrepublik Deutschland (2019). Belegte Kurse in der gymnasialen Oberstufe der allgemeinbildenden Gymnasien und Integrierten Gesamtschulen: Schuljahr 2018/2019.
- KMK - Sekretariat der ständigen Konferenz der Kultusminister in der Bundesrepublik Deutschland (2020). Bildungsstandards im Fach Biologie für die Allgemeine Hochschulreife: Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020.

- Korbach, A., Brünken, R. & Park, B. (2018). Differentiating Different Types of Cognitive Load: a Comparison of Different Measures. *Educational Psychology Review*, 30(2), 503–529. <https://doi.org/10.1007/s10648-017-9404-8>
- Küçük, S., Kapakin, S. & Göktaş, Y. (2016). Learning anatomy via mobile augmented reality: Effects on achievement and cognitive load. *Anatomical sciences education*, 9(5), 411–421. <https://doi.org/10.1002/ase.1603>
- Küçük, S., YILMAZ, R. & Göktaş, Y. (2014). Augmented Reality for Learning English: Achievement, Attitude and Cognitive Load Levels of Students. *TED EĞİTİM VE BİLİM*, 39(176). <https://doi.org/10.15390/EB.2014.3595>
- Lai, A.-F., Chen, C.-H. & Lee, G.-Y. (2019). An augmented reality-based learning approach to enhancing students' science reading performances from the perspective of the cognitive load theory. *British Journal of Educational Technology*, 50(1), 232–247. <https://doi.org/10.1111/bjet.12716>
- Laugwitz, B., Held, T. & Schrepp, M. (2008). Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire. In A. Holzinger (Hrsg.), *Lecture Notes in Computer Science: Bd. 5298. HCI and usability for education and work: 4th Symposium of the Workgroup Human-Computer Interaction and Usability Engineering of the Austrian Computer Society* (Bd. 5298, S. 63–76). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-89350-9_6
- Leppink, J. (2017). Cognitive load theory: Practical implications and an important challenge. *Journal of Taibah University Medical Sciences*, 12(5), 385–391. <https://doi.org/10.1016/j.jtumed.2017.05.003>
- Leppink, J., Paas, F., van der Vleuten, C. P. M., van Gog, T. & van Merriënboer, J. J. G. (2013). Development of an instrument for measuring different types of cognitive load. *Behavior research methods*, 45(4), 1058–1072. <https://doi.org/10.3758/s13428-013-0334-1>
- Leppink, J., Paas, F., van Gog, T., van der Vleuten, C. P. M. & van Merriënboer, J. J. G. (2014). Effects of pairs of problems and examples on task performance and different types of cognitive load. *Learning and Instruction*, 30, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.12.001>
- Leyh, A. (2011a, 8. September). *Das Gehirn. Anatomie: Präfrontaler Cortex, der Frontallappen des Gehirns*. <https://www.dasgehirn.info/grundlagen/anatomie/der-frontallappen>
- Leyh, A. (2011b, 9. September). *Das Gehirn. Anatomie: Parietallappen und Somatosensorik im Gehirn*. <https://www.dasgehirn.info/grundlagen/anatomie/der-parietallappen>

- Li, C.-H. (2016). Confirmatory factor analysis with ordinal data: Comparing robust maximum likelihood and diagonally weighted least squares. *Behavior research methods*, 48(3), 936–949. <https://doi.org/10.3758/s13428-015-0619-7>
- Lin, H.-C. K., Hsieh, M.-C., Wang, C.-H [Cheng-Hung], Sie, Z.-Y. & Chang, S.-H. (2011). Establishment and Usability Evaluation of an interactive AR Learning System on Conservation of Fish. *The Turkish Online Journal of Educational Technology*, 10(4), 181–187.
- Lincoln, P. (2017). *Low Latency Displays for Augmented Reality*. University of North Carolina, Chapel Hill.
- Little, T. D. (2013). *The Oxford Handbook of Quantitative Methods in Psychology: Vol. 2*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199934898.001.0001>
- Liu, I.-F., Chen, M. C., Sun, Y. S., Wible, D. & Kuo, C.-H. (2010). Extending the TAM model to explore the factors that affect Intention to Use an Online Learning Community. *Computers & Education*, 54(2), 600–610. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2009.09.009>
- Liu, W. (2010). Natural user interface- next mainstream product user interface. In *2010 IEEE 11th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design* (Vol. 1, S. 203–205). IEEE. <https://doi.org/10.1109/caidcd.2010.5681374>
- Lowe, B., D'Alessandro, S., Winzar, H., Des Laffey & Collier, W. (2013). The use of Web 2.0 technologies in marketing classes: Key drivers of student acceptance. *Journal of Consumer Behaviour*, 12(5), 412–422. <https://doi.org/10.1002/cb.1444>
- Luo, L. (2016). *Principles of neurobiology*. Garland Science Taylor & Francis Group.
- Magner, U. I., Schwonke, R., Aleven, V., Popescu, O. & Renkl, A. (2014). Triggering situational interest by decorative illustrations both fosters and hinders learning in computer-based learning environments. *Learning and Instruction*, 29, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2012.07.002>
- Maike, V. R. M. L., Buchdid, S. B. & Baranauskas, M. C. C. (2015). Designing Natural User Interfaces Scenarios for All and for Some: An Analysis Informed by Organizational Semiotics Artifacts. In K. Liu, K. Nakata, W. Li & D. Galarreta (Hrsg.), *IFIP Advances in Information and Communication Technology. Information and Knowledge Management in Complex Systems* (Bd. 449, S. 92–101). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16274-4_10
- Manuell, A. L., Quispe, J. & Mayfield, S. P. (2007). Structure of the chloroplast ribosome: novel domains for translation regulation. *PLoS biology*, 5(8), e209. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0050209>
- Martin, W. & Mentel, M. (2010). The Origin of Mitochondria. *Nature Education*, 3(9), 58.

- Martini, F. H., Timmons, M. J. & Tallitsch, R. B. (2012). *Anatomie* (6. Aufl.). Pearson Studium - Medizin. Pearson Studium.
- Masneri, S., Domínguez, A., Zorrilla, M., Larrañaga, M. & Arruarte, A. (2022). Interactive, Collaborative and Multi-user Augmented Reality Applications in Primary and Secondary Education. A Systematic Review. *JUCS - Journal of Universal Computer Science*, 28(6), 564–590. <https://doi.org/10.3897/jucs.76535>
- McCall, R., Wetzel, R., Löschner, J. & Braun, A.-K. (2011). Using presence to evaluate an augmented reality location aware game. *Personal and Ubiquitous Computing*, 15(1), 25–35. <https://doi.org/10.1007/s00779-010-0306-8>
- McCombs, B. L. (1991). Motivation and Lifelong Learning. *Educational Psychologist*, 26(2), 117–127. https://doi.org/10.1207/s15326985ep2602_4
- Mehren, M. & Mehren, R. (2020). Über die Tiefenstrukturen des (Geographie-)Unterrichts. *Praxis Geographie*, 4, 4–9.
- Merge Labs. (2021, 27. Mai). *Merge. Merge Cube | AR/VR Learning & Creation*. <https://mergeedu.com/cube>
- Metaxas, A. & Kempf, S. J. (2016). Neurofibrillary tangles in Alzheimer's disease: elucidation of the molecular mechanism by immunohistochemistry and tau protein phospho-proteomics. *Neural regeneration research*, 11(10), 1579–1581. <https://doi.org/10.4103/1673-5374.193234>
- Milgram, P. & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 77, 1321–1329.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81–97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>
- Moreno, R. (2010). Cognitive load theory: more food for thought. *Instructional Science*, 38(2), 135–141. <https://doi.org/10.1007/s11251-009-9122-9>
- Moreno, R. & Park, B. (2010). Cognitive Load Theory: Historical Development and Relation to Other Theories. In J. L. Plass, R. Moreno & R. Brunken (Hrsg.), *Cognitive Load Theory* (S. 9–28). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511844744.003>
- Mousavi, S. Y., Low, R. & Sweller, J. (1995). Reducing cognitive load by mixing auditory and visual presentation modes. *Journal of Educational Psychology*, 87(2), 319–334. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.87.2.319>
- Müller, F., Ritz, C., Welk, E. & Wesche, K. (2016). *Rothmaler - Exkursionsflora von Deutschland*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-8274-3132-5>
- Munoz-Cristobal, J. A., Jorriñ-Abellan, I. M., Asensio-Perez, J. I., Martinez-Mones, A., Prieto, L. P. & Dimitriadis, Y. (2015). Supporting Teacher Orchestration in Ubiquitous

- Learning Environments: A Study in Primary Education. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 8(1), 83–97. <https://doi.org/10.1109/TLT.2014.2370634>
- Murray, J. H. (2001). *Hamlet on the holodeck: The future of narrative in cyberspace* (4. Aufl.). MIT Press.
- MWWK - Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur (1998). Lehrplan Biologie: Grund- und Leistungsfach, Jahrgangstufen 11 bis 13 der gymnasialen Oberstufe (Mainzer Studienstufe).
- MWWK - Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur (2014). Lehrpläne für die naturwissenschaftlichen Fächer für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz: Biologie, Chemie, Physik.
- Nacheva, R. (2015). *Principles of User Interface Design: Important Rules that Every Designer Should Follow*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5148.8083>
- Nakamura, J. & Csikszentmihalyi, M. (2009). Flow Theory and Research. In C. R. Snyder & S. J. Lopez (Hrsg.), *Oxford library of psychology. Oxford handbook of positive psychology* (2. Aufl., S. 194–206). Oxford Univ. Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780195187243.013.0018>
- Nash, E. B., Edwards, G. W., Thompson, J. A. & Barfield, W. (2000). A Review of Presence and Performance in Virtual Environments. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 12(1), 1–41. https://doi.org/10.1207/S15327590IJHC1201_1
- Nichols, J. D. & Miller, R. B. (1994). Cooperative Learning and Student Motivation. *Contemporary Educational Psychology*, 19(2), 167–178. <https://doi.org/10.1006/ceps.1994.1015>
- Nielsen, J. (1994). Enhancing the explanatory power of usability heuristics. In B. Adelson, S. Dumais & J. Olson (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems celebrating interdependence - CHI '94* (S. 152–158). ACM Press. <https://doi.org/10.1145/191666.191729>
- Nielsen, J. (2010). *Usability engineering*. Kaufmann.
- Norman, D. A. (2013). *The Design of Everyday Things: Revised and Expanded edition*. Basic Books.
- O'Shea, P., Mitchell, R., Johnston, C. & Dede, C. (2009). Lessons Learned about Designing Augmented Realities. *International Journal of Gaming and Computer-Mediated Simulations*, 1(1), 1–15. <https://doi.org/10.4018/jgcms.2009010101>
- Oviatt, S., Arthur, A. & Cohen, J [Julia] (2006). Quiet interfaces that help students think. In P. Wellner (Hrsg.), *Proceedings of the 19th annual ACM symposium on User interface software and technology* (S. 191–200). ACM. <https://doi.org/10.1145/1166253.1166284>

- Paas, F. G. (1992). Training strategies for attaining transfer of problem-solving skill in statistics: A cognitive-load approach. *Journal of Educational Psychology*, 84(4), 429–434. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.84.4.429>
- Park, B., Knörzer, L., Plass, J. L. & Brünken, R. (2015). Emotional design and positive emotions in multimedia learning: An eyetracking study on the use of anthropomorphisms. *Computers & Education*, 86, 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.02.016>
- Peterson, L. R. & Peterson, M. J. (1959). Short-term retention of individual verbal items. *Journal of experimental psychology*, 58, 193–198. <https://doi.org/10.1037/h0049234>
- Pintrich, P. R. (2003). Motivation and classroom learning. In W. M. Reynolds & G. E. Miller (Hrsg.), *Handbook of Psychology* (Bd. 7, S. 103–122). John Wiley & Sons Inc.
- Pituch, K. A. & Stevens, J. P. (2016). *Applied multivariate statistics for the social sciences: Analyses with SAS and IBM's SPSS* (6. Aufl.). Routledge Taylor and Francis Group.
- Pontes, U. (2011, 3. September). *Das Gehirn. Anatomie: Der Cortex, die Graue Substanz*. <https://www.dasgehirn.info/grundlagen/anatomie/der-cortex>
- Pross, H. (1972). *Medienforschung: Film, Funk, Presse, Fernsehen. Das Wissen der Gegenwart : Geisteswissenschaften*. Habel.
- Pschyrembel, W. & Hildebrandt, H. (1994). *Pschyrembel klinisches Wörterbuch* (257. Aufl.). Walter de Gruyter.
- PTC. (2020a, 13. November). *Vuforia Developer Library. Multi Target*. <https://library.vuforia.com/content/vuforia-library/en/features/images/multi-target.html>
- PTC. (2020b, 13. November). *Vuforia Developer Library. Object Reco*. <https://library.vuforia.com/content/vuforia-library/en/features/objects/object-reco.html>
- Pyka, M. (o. J.). *Paperbrain*. <http://www.martinpyka.de/paperbrain/>
- Radu, I. (2014). Augmented reality in education: a meta-review and cross-media analysis. *Personal and Ubiquitous Computing*, 18(6), 1533–1543. <https://doi.org/10.1007/s00779-013-0747-y>
- Rafelski, S. M. (2013). Mitochondrial network morphology: building an integrative, geometrical view. *BMC biology*, 11, 71. <https://doi.org/10.1186/1741-7007-11-71>
- Rafiola, R., Setyosari, P., Radjah, C. & Ramli, M. (2020). The Effect of Learning Motivation, Self-Efficacy, and Blended Learning on Students' Achievement in The Industrial Revolution 4.0. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)*, 15(8), 71–82.
- Reinmann-Rothmeier, G. & Mandl, H. (2000). *Lexikon der Psychologie. Wissen*. <https://www.spektrum.de/lexikon/psychologie/wissen/16892>

- Reiss, A. B., Arain, H. A., Stecker, M. M., Siegart, N. M. & Kasselmann, L. J. (2018). Amyloid toxicity in Alzheimer's disease. *Reviews in the neurosciences*, 29(6), 613–627. <https://doi.org/10.1515/revneuro-2017-0063>
- Roger, A. J., Muñoz-Gómez, S. A. & Kamikawa, R. (2017). The Origin and Diversification of Mitochondria. *Current biology*, 27(21), R1177-R1192. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.09.015>
- Ryan, M.-L. (2003). *Narrative as Virtual Reality: Immersion and Interactivity in Literature and Electronic Media*. Parallax. Johns Hopkins University Press.
- Salminen, A., Kaarniranta, K., Kauppinen, A., Ojala, J., Haapasalo, A., Soininen, H. & Hiltunen, M. (2013). Impaired autophagy and APP processing in Alzheimer's disease: The potential role of Beclin 1 interactome. *Progress in neurobiology*, 106-107, 33–54. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2013.06.002>
- Salomon, G. (1984). Television is "easy" and print is "tough": The differential investment of mental effort in learning as a function of perceptions and attributions. *Journal of Educational Psychology*, 76(1), 647–658. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.76.4.647>
- Sánchez-Baracaldo, P., Raven, J. A., Pisani, D. & Knoll, A. H. (2017). Early photosynthetic eukaryotes inhabited low-salinity habitats. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(37), E7737-E7745. <https://doi.org/10.1073/pnas.1620089114>
- Sawicka, A., Kopainsky, B. & Gonzalez, J. J. (2008). Learning about Dynamic Problems with Computer Simulators: A Case of System Dynamics Simulation Models. In 2008 *Eighth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies* (S. 569–571). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICALT.2008.130>
- Schrader, C. & Bastiaens, T. J. (2012). The influence of virtual presence: Effects on experienced cognitive load and learning outcomes in educational computer games. *Computers in Human Behavior*, 28(2), 648–658. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2011.11.011>
- Schrepp, M. (2016). Datenqualität bei Online-Fragebögen sicherstellen. In S. Hess & H. Fischer (Hrsg.), *UP 2016: Usability Professionals*. Gesellschaft für Informatik e.V. und die German UPA e.V.
- Schrepp, M. (2018a). *UEQ: User Experience Questionnaire* [Data Analysis Tool]. https://www.ueq-online.org/Material/Data_Analysis_Tools.zip
- Schrepp, M. (2018b). *User Experience mit Fragebögen messen*.
- Schrepp, M. (2019). *User Experience Questionnaire Handbook: All you need to know to apply the UEQ successfully in your projects*. Version 8. <https://www.ueq-online.org/Material/Handbook.pdf>

- Schrepp, M., Hinderks, A. & Thomaschewski, J. (2014). Applying the User Experience Questionnaire (UEQ) in Different Evaluation Scenarios. In A. Marcus (Hrsg.), *Design, User Experience, and Usability. Theories, Methods, and Tools for Designing the User Experience* (S. 383–392). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07668-3_37
- Seufert, T. & Brünken, R. (2006). Cognitive load and the format of instructional aids for coherence formation. *Applied Cognitive Psychology*, 20(3), 321–331. <https://doi.org/10.1002/acp.1248>
- Seufert, T., Jänen, I. & Brünken, R. (2007). The impact of intrinsic cognitive load on the effectiveness of graphical help for coherence formation. *Computers in Human Behavior*, 23(3), 1055–1071. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2006.10.002>
- Shneiderman, B., Plaisant, C., Cohen, M., Jacobs, S. & Elmqvist, N. (2016). *Designing the user interface: Strategies for effective human-computer interaction* (6. Aufl.). Pearson.
- Slater, M. (2003). A Note on Presence Terminology. *Presence Connect*, 3.
- Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 364(1535), 3549–3557. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0138>
- Slater, M. & Wilbur, S. (1997). A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6), 603–616. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>
- Sotiriou, S. & Bogner, F. X. (2008). Visualizing the Invisible: Augmented Reality as an Innovative Science Education Scheme. *Advanced Science Letters*, 1(1), 114–122. <https://doi.org/10.1166/asl.2008.012>
- Spörhase-Eichmann, U. (Hrsg.). (2015). *Biologie-Didaktik: Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (7. Auflage). Cornelsen Scriptor.
- Squire, K. & Klopfer, E. (2007). Augmented Reality Simulations on Handheld Computers. *Journal of the Learning Sciences*, 16(3), 371–413. <https://doi.org/10.1080/10508400701413435>
- Sternheim, E., Thyssen, C., Lutz, P. & Kins, S. (2017). *Über das Vergessen lernen – Alzheimer Demenz im Biologieunterricht*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53759-6>
- Storch, V. & Welsch, U. (2014). *Kükenthal Zoologisches Praktikum*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41937-9>
- Stumpff, S., Knopf, T. & Michelis, D. (2019). User Experience Design With Augmented Reality (AR). In *ECIE 2019 14th European Conference on Innovation and Entrepreneurship*.

- Su, C.-H. (2016). The effects of students' motivation, cognitive load and learning anxiety in gamification software engineering education: a structural equation modeling study. *Multimedia Tools and Applications*, 75(16), 10013–10036. <https://doi.org/10.1007/s11042-015-2799-7>
- Suh, Y. (2015). The Performance of Maximum Likelihood and Weighted Least Square Mean and Variance Adjusted Estimators in Testing Differential Item Functioning With Nonnormal Trait Distributions. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 22(4), 568–580. <https://doi.org/10.1080/10705511.2014.937669>
- Sweller, J. (1988). Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257–285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
- Sweller, J. (1989). Cognitive technology: Some procedures for facilitating learning and problem solving in mathematics and science. *Journal of Educational Psychology*, 81(4), 457–466. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.81.4.457>
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, 4(4), 295–312. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90003-5)
- Sweller, J. (2010a). Cognitive Load Theory: Recent Theoretical Advances. In J. L. Plass, R. Moreno & R. Brunken (Hrsg.), *Cognitive Load Theory* (S. 29–47). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511844744.004>
- Sweller, J. (2010b). Element Interactivity and Intrinsic, Extraneous, and Germane Cognitive Load. *Educational Psychology Review*, 22(2), 123–138. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9128-5>
- Sweller, J. (2011). Cognitive Load Theory. In J. Mestre (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation. Cognition in education* (Bd. 55, S. 37–76). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387691-1.00002-8>
- Sweller, J., Ayres, P. & Kalyuga, S. (Hrsg.). (2011a). *Cognitive Load Theory*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4>
- Sweller, J., Ayres, P. & Kalyuga, S. (2011b). Intrinsic and Extraneous Cognitive Load. In J. Sweller, P. Ayres & S. Kalyuga (Hrsg.), *Cognitive Load Theory* (S. 57–69). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4_5
- Sweller, J. & Chandler, P. (1994). Why Some Material Is Difficult to Learn. *Cognition and Instruction*, 12(3), 185–233. https://doi.org/10.1207/s1532690xci1203_1
- Sweller, J. & Cooper, G. A. (1985). The Use of Worked Examples as a Substitute for Problem Solving in Learning Algebra. *Cognition and Instruction*, 2(1), 59–89. https://doi.org/10.1207/s1532690xci0201_3

- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G. & Paas, F. G. W. C. (1998). Cognitive Architecture and Instructional Design. *Educational Psychology Review*, 10(3), 251–296.
<https://doi.org/10.1023/A:1022193728205>
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G. & Paas, F. G. W. C. (2019). Cognitive Architecture and Instructional Design: 20 Years Later. *Educational Psychology Review*, 31(2), 261–292. <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09465-5>
- Tacchino, F., Succurro, A., Ebenhöf, O. & Gerace, D. (2019). Optimal efficiency of the Q-cycle mechanism around physiological temperatures from an open quantum systems approach. *Scientific Reports*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52842-x>
- Tarmizi, R. A. & Sweller, J. (1988). Guidance during mathematical problem solving. *Journal of Educational Psychology*, 80(4), 424–436. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.80.4.424>
- Tavakoli, H. (2013). *A dictionary of research methodology and statistics in applied linguistics*. Rahnamā Press.
- Thees, M., Kapp, S., Altmeyer, K., Malone, S., Brünken, R. & Kuhn, J. (2021). Comparing Two Subjective Rating Scales Assessing Cognitive Load During Technology-Enhanced STEM Laboratory Courses. *Frontiers in Education*, 6, 705551.
<https://doi.org/10.3389/educ.2021.705551>
- Thees, M., Kapp, S., Strzys, M. P., Beil, F., Lukowicz, P. & Kuhn, J. (2020). Effects of augmented reality on learning and cognitive load in university physics laboratory courses. *Computers in Human Behavior*, 108, 106316.
<https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106316>
- Thon, J.-N. (2008). Immersion Revisited: On the Value of a Contested Concept. In O. Leino, H. Wirman & A. Fernandez (Hrsg.), *Extending Experiences: Structure, Analysis and Design of Computer Game Player Experience* (29-43). Lapland University Press.
- Thyssen, C., Hoffmann, C., Probst, C. & Huwer, J. (2020). Augmented Reality: Unterrichten mit erweiterter Realität. *Unterricht Biologie*, 455, 41–44.
- Tognazzini, B. (2014). *First Principles of Interaction Design (Revised & Expanded)*.
<https://asktog.com/atc/principles-of-interaction-design/>
- Turan, Z., Meral, E. & Sahin, I. F. (2018). The impact of mobile augmented reality in geography education: achievements, cognitive loads and views of university students. *Journal of Geography in Higher Education*, 42(3), 427–441.
<https://doi.org/10.1080/03098265.2018.1455174>
- Ullmer, B. & Ishii, H. (2000). Emerging frameworks for tangible user interfaces. *IBM Systems Journal*(39), 915–931.

- Ullrich, C., Shen, R., Tong, R. & Tan, X. (2010). A Mobile Live Video Learning System for Large-Scale Learning—System Design and Evaluation. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 3(1), 6–17. <https://doi.org/10.1109/TLT.2009.54>
- Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V. & Reece, J. B. (2019). *Campbell Biologie* (11. Aufl.). *Pearson Studium - Biologie*. Pearson Education Deutschland GmbH.
- van Merriënboer, J. J. G. & Krammer, H. P. M. (1987). Instructional strategies and tactics for the design of introductory computer programming courses in high school. *Instructional Science*, 16(3), 251–285. <https://doi.org/10.1007/BF00120253>
- VandenBos, G. R. (Hrsg.). (2015). *APA dictionary of psychology* (2. Aufl.). American Psychological Association.
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=985892>
- Verband Bildung und Erziehung e.V. & forsa Politik- und Sozialforschung GmbH. (2021). *Die Schule aus Sicht der Schulleiterinnen und Schulleiter: Berufszufriedenheit von Schulleitungen und Digitalisierung an Schulen*.
- Verma, J. P. (2016). *Repeated measures design for empirical researchers*. Wiley.
- Visch, V. T., Tan, E. S. & Molenaar, D. (2010). The emotional and cognitive effect of immersion in film viewing. *Cognition & Emotion*, 24(8), 1439–1445.
<https://doi.org/10.1080/02699930903498186>
- Wagenschein, M. (1964). *Zum Begriff des exemplarischen Lehrens* (5./6. Aufl.). Beltz.
https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/1989/1989_12_01-EPA-Biologie.pdf
- Wang, C.-H [Chao-Hung], Chiang, Y.-C. & Wang, M.-J. (2015). Evaluation of an Augmented Reality Embedded On-line Shopping System. *Procedia Manufacturing*, 3, 5624–5630.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.766>
- Warner, R. M. (2013). *Applied statistics: From bivariate through multivariate techniques* (2. Aufl.). Sage.
- Weibel, D. & Wissmath, B. (2011). Immersion in Computer Games: The Role of Spatial Presence and Flow. *International Journal of Computer Games Technology*, 2011(3), 1–14. <https://doi.org/10.1155/2011/282345>
- Weinert, F. E. (Hrsg.). (2002). *Beltz Pädagogik. Leistungsmessungen in Schulen* (2. Aufl.). Beltz.
- Wikitude. (2020, 8. September). *Wikitude SDK Studio User Manual: Object Targets*.
<https://www.wikitude.com/external/doc/documentation/studio/targetmanagement.html#object-targets>
- Wilkes, C. (2021, 22. Mai). *Carlos Wilkes. LeanTouch*. <http://carloswilkes.com/#LeanTouch>

- Witmer, B. G. & Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence*, 7(3), 225–240.
- Wokittel, H. (1994). Medienbegriff und Medienbewertungen in der pädagogischen Theoriegeschichte. In S. Hiegemann & W. H. Swoboda (Hrsg.), *Handbuch der Medienpädagogik* (S. 25–36). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
https://doi.org/10.1007/978-3-322-89931-6_2
- Wu, H.-K., Lee, S. W.-Y., Chang, H.-Y. & Liang, J.-C. (2013). Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. *Computers & Education*, 62, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.10.024>
- Yip, J., Wong, S.-H., Yick, K.-L., Chan, K. & Wong, K.-H. (2019). Improving quality of teaching and learning in classes by using augmented reality video. *Computers & Education*, 128, 88–101. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.09.014>
- Zukić, M., Đapo, N. & Husremović, D. (2016). Construct and Predictive Validity of an Instrument for Measuring Intrinsic, Extraneous and Germane Cognitive Load. *Universal Journal of Psychology*, 4(5), 242–248.
<https://doi.org/10.13189/ujp.2016.040505>

11 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name Carsten Hoffmann

Berufserfahrung

09/2022 – heute	Kurpfalz Internat Bammental Bammental Ernennung zum Studienrat Fächer: Biologie, Geographie & NwT
08/2017 – 12/2020	Technische Universität Kaiserslautern AG Didaktik der Biologie Wissenschaftlicher Mitarbeiter
02/2016 – 08/2017	Kurpfalz Realschule Plus Kaiserslautern PES, vertretende Lehrtätigkeit
03/2017 – 04/2017	Käthe-Kollwitz-Gymnasium Neustadt a. d. W. Vertiefendes Praktikum (Biologie)
01/2015 – 07/2015	Colegio Agustín Nieto Caballero Bogotá/Kolumbien Lehrtätigkeit als Gastlehrer
03/2014 – 04/2014	Gymnasium am Rittersberg Kaiserslautern Vertiefendes Praktikum (Geographie)
10/2011 – 08/2014	Arbeiter-Samariter-Bund Kaiserslautern Nebentätigkeit als Rettungssanitäter
01/2011 – 09/2011	Deutsches Rotes Kreuz Neuerburg Hauptamtliche Tätigkeit als Rettungssanitäter
05/2010 – 12/2010	Deutsches Rotes Kreuz Bitburg Zivildienst im Rettungsdienst

Weiterbildungen & Vorträge

Fortbildungen	Jugend Präsentiert Multiplikator; NwT-Zusatzausbildung, kleiner Schul-Maschinenschein, Veranstaltungen zu Mediendidaktik und Medienpädagogik
Vorträge	Lehrkräftefortbildungen und Workshops zum Einsatz von Augmented Reality im Biologieunterricht (Dozententätigkeit im Rahmen der Promotion)

Publikationen

Thyssen, C. & Hoffmann, C. (2021). Medien mit Augmented Reality erweitern: Virtuelles Add-On zur Aufbereitung von Medien. In J. Maxton-Küchenmeister & J. Meßinger-Koppelt (Hrsg.). *Naturwissenschaften digital* (Band 1, überarbeitete Auflage, S. 30-33). Joachim Herz Stiftung.

Thyssen, C., Hoffmann, C., Frey, L., Schmoll, I., & Huwer, J. (2020). Ich sehe was, was du nicht siehst. *Unterricht Biologie*, 459, 44-47, Friedrich Verlag.

Thyssen, C., Hoffmann, C., Probst, C. & Huwer, J. (2020). Augmented Reality: Unterrichten mit erweiterter Realität. *Unterricht Biologie*, 455, 41-44, Friedrich Verlag.

Thyssen, C. & Hoffmann, C. (2019). *Combining established teaching Media with Augmented Reality (AR) – Investigation of the Effects on Learning Results and of Teachers' and Students' Views on AR*. ESERA Bologna, August 2019.

Thyssen, C., Hoffmann, C., & Kins, S. (2019). *Entwicklung und Evaluation von AR basierten Lernumgebungen*. FDdB Tagung Wien, September 2019.

Thyssen C. & Hoffmann C. (2018). Medien mit Augmented Reality erweitern. In J. Maxton-Küchenmeister & J. Meßinger-Koppelt (Hrsg.). *Naturwissenschaften digital: Toolbox für den Unterricht*. Joachim Herz Stiftung.

Auszeichnungen und Förderungen

Stipendiat der Exzellenzförderung | *Förderung exzellenter Studierender*

Abiturpreis Sport des Landessportbundes | *Rheinland-Pfalz 2010*

Pierre de Coubertin-Medaille | *verliehen vom Ministerium für Bildung, Frauen und Jugend Rheinland-Pfalz sowie durch das Internationale Pierre de Coubertin-Komitee für hervorragende Leistungen im Schulsport der Studienstufe verbunden mit fairer Haltung und persönlichem Engagement innerhalb der Schulgemeinschaft*

12 Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre wahrheitsgemäß, dass ich die eingereichte Dissertation selbst angefertigt und alle für die Arbeit benutzten Hilfsmittel und Hilfestellungen in der Arbeit angegeben habe. Die Dissertation oder Teile hiervon habe ich bisher nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht. Ebenso habe ich die gleiche oder eine andere Abhandlung nicht bei einem anderen Fachbereich oder einer anderen Universität als Dissertation eingereicht.

Leimen, 04.05.2023

Carsten Hoffmann

13 Anhang

Anhangsverzeichnis

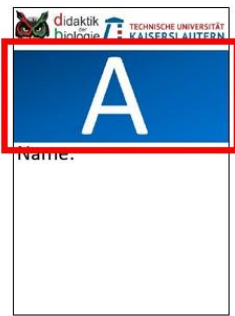

Anhangsverzeichnis	I
1 Unterrichtsmaterialien	A1
1.1 Studie Alzheimerkoffer	A1
1.1.1 Einführungsfolien/Sicherung	A1
1.1.2 Lernheft A Sekundarstufe I	A9
1.1.3 Lernheft B Sekundarstufe I	A21
1.1.4 Material A Sekundarstufe I	A33
1.1.5 Material B Sekundarstufe I	A41
1.1.6 Lernheft A Sekundarstufe II	A49
1.1.7 Lernheft B Sekundarstufe II	A61
1.1.8 Material A Sekundarstufe II	A73
1.1.9 Material B Sekundarstufe II	A80
1.2 Studie Mitochondrien und Chloroplasten	A88
1.2.1 Einführungsfolien/Sicherung	A88
1.2.2 Arbeitsblatt	A95
1.2.3 Triggerbilder für AR-Anwendung	A98
1.3 Studie HoloBrain	A99
1.3.1 Einführungsfolien und Organisation	A99
1.3.2 3D QR-Cube	A106
1.3.3 Papiermodell	A107
2 Organisatorisches und Datenerhebung	A109
2.1 Allgemein	A109
2.1.1 Untersuchungsanzeige bei der ADD	A109
2.1.2 Einverständnis- und Datenschutzerklärung	A112
2.1.3 Anschreiben Kooperationsangebot (App-Entwicklung)	A115
2.1.4 Anschreiben Hauptstudien	A117
2.1.5 Befragung nach LS (exemplarisch)	A119
2.1.6 Abschlussbefragung (exemplarisch)	A125
2.2 Studie Alzheimerkoffer	A136
2.2.1 Pre- und Posttest (Paper-Pencil)	A136
2.2.2 Auswertungsmatrix mit Variablenbezeichnung	A141
2.3 Studie Mitochondrien und Chloroplasten	A146
2.3.1 Pre- und Posttest (LimeSurvey)	A146
2.4 Studie HoloBrain	A149
2.4.1 Pre- und Posttest (OLAT)	A149

3	Tabellarische Ergebnisse	A152
3.1	Analyse der Testinstrumente	A152
3.1.1	Hauptkomponentenanalyse: CLT	A152
3.1.2	Konfirmatorische Faktorenanalyse 1: CLT	A154
3.1.3	Konfirmatorische Faktorenanalyse 2: CLT	A157
3.1.4	Reliabilität Mitochondrien und Chloroplasten: UEQ	A160
3.1.5	Reliabilität HoloBrain: UEQ	A160
3.1.6	Konfirmatorische Faktorenanalyse 1: UEQ	A161
3.1.7	Konfirmatorische Faktorenanalyse 2: UEQ	A167
3.1.8	Hauptkomponentenanalyse: ELU	A173
3.1.9	Konfirmatorische Faktorenanalyse 1: ELU	A175
3.1.10	Konfirmatorische Faktorenanalyse 2: ELU	A179
3.1.11	Reliabilität HoloBrain: ARI	A183
3.1.12	Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung: ARI	A183
3.2	Ergebnistabellen.....	A184
3.2.1	Mittelwertvergleich: Kognitive Leistungstest (t-Test)	A184
3.2.2	Mittelwertvergleich: Cognitive Load (t-Test)	A185
3.2.3	Mittelwertvergleich: Cognitive Loads (Mann-Whitney-U & Wilcoxon)	A187
3.2.4	Mittelwertvergleich: UEQ (t-Test)	A188
3.2.5	Mittelwertvergleich: ELU (t-Test)	A189
3.2.6	Mittelwertvergleich: ARI (t-Test)	A189
3.2.7	Mittelwertvergleich: ARI (Mann-Whitney-U & Wilcoxon)	A189
3.2.8	Strukturgleichungsmodell CLT und LZ	A190
3.2.9	Multiple lineare Regressionen CLT	A192
3.2.10	Strukturgleichungsmodell CLT und UEQ	A195
3.2.11	MANOVA UEQ und CLT (Mitochondrien und Chloroplasten)	A197
3.2.12	Strukturgleichungsmodelle CLT und ELU	A199
3.2.13	Multiple lineare Regression ARI und LZ	A205

1 Unterrichtsmaterialien



1.1 Studie Alzheimerkoffer

1.1.1 Einführungsfolien/Sicherung

vorne	hinten
	<p>Deine Kennung:</p> <p>LIWI</p>
	<p>Deine Kennung:</p> <p>RUMA</p>

!!!GANZ WICHTIG!!!

Gruppe bitte bei **ALLEN** Umfragen und TESTS eingeben


vorne	hinten
	<p>Deine Kennung:</p> <p>LIWI</p>
	<p>Deine Kennung:</p> <p>RUMA</p>

!!!GANZ WICHTIG!!!

Gruppe bitte bei **ALLEN** Umfragen und TESTS eingeben

Kennung bitte bei **ALLEN** Umfragen und TESTS eingeben

Bitte NIE deinen Namen eingeben!



Station 3 – Der innere Aufbau des Gehirns (II)

A7.

- Zeichne in das Bild der Gehirnschleibe (Abb. 5) den Schläfen- und Stirnlappen ein. Die App (→ 3D Gehirn) hilft dir dabei.
- Lies den Text M2 („Was ist eigentlich ein MRT?“) und zeichne mithilfe der App (→ MRT und Phasen ...) die graue und weiße Substanz ein.
- Schau dir nochmal den Hippocampus und die Ventrikel in der Abbildung 2 (Seite 3) an und überlege wo diese im Bild der Gehirnschleibe (Abb. 5) sein könnten und zeichne sie ein. Überprüfe deine Lösung, indem du die App (→ MRT und Phasen ...) zur Hilfe nimmst.





Abb. 5: Bild der Gehirnschleibe

Beantworte die Umfrage: Aufgabe 7 „innerer Aufbau Gehirn“ auf dem Tablet!



Station 3 – Der innere Aufbau des Gehirns (II)

A7.

- Zeichne in das Bild der Gehirnschleibe (Abb. 5) den Schläfen- und Stirnlappen ein. Die App (→ 3D Gehirn) hilft dir dabei.
- Lies den Text M2 („Was ist eigentlich ein MRT?“) und zeichne mithilfe der App (→ MRT und Phasen ...) die graue und weiße Substanz ein.
- Schau dir nochmal den Hippocampus und die Ventrikel in der Abbildung 2 (Seite 3) an und überlege wo diese im Bild der Gehirnschleibe (Abb. 5) sein könnten und zeichne sie ein. Überprüfe deine Lösung, indem du die App (→ MRT und Phasen ...) zur Hilfe nimmst.


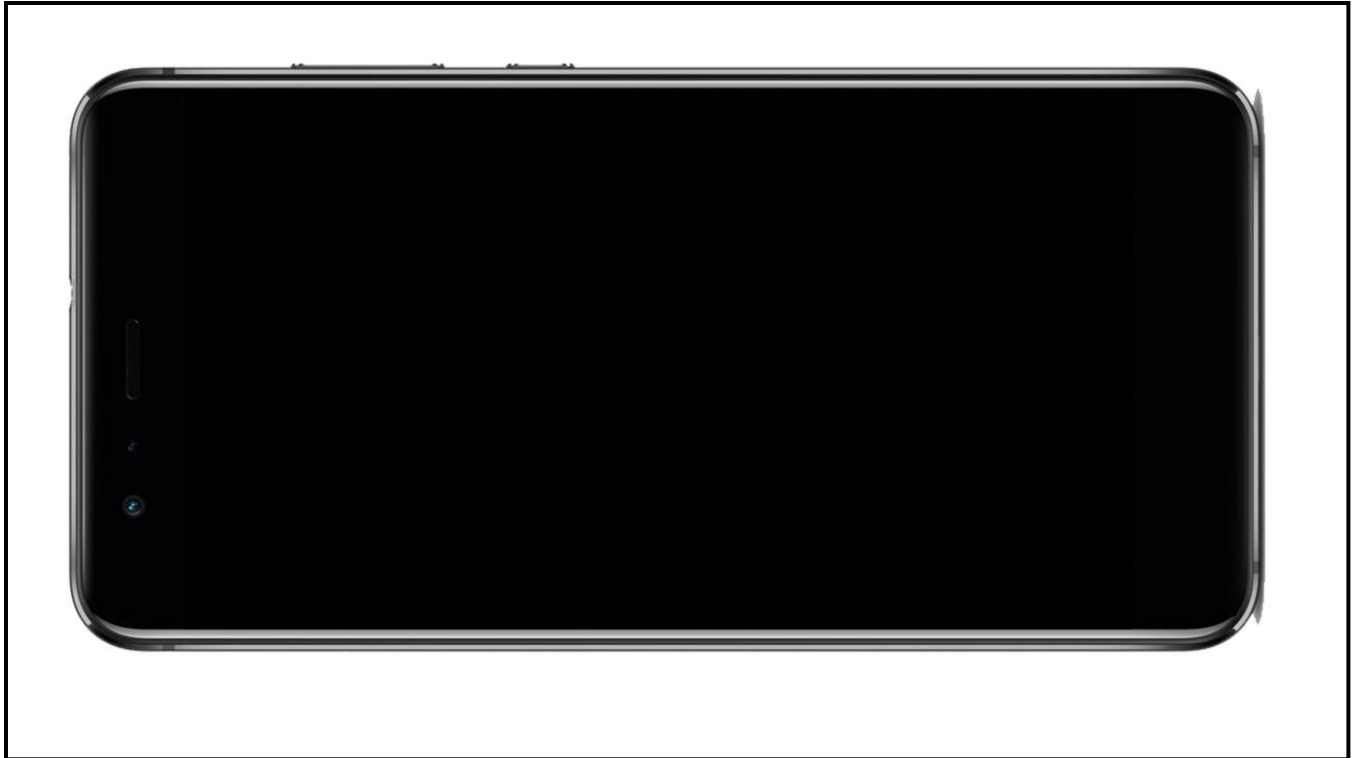


Abb. 5: Bild der Gehirnschleibe

Beantworte die Umfrage: Aufgabe 7 „innerer Aufbau Gehirn“ auf dem Tablet!



Hilfestellung Erarbeitungsphase

Station 3 – Der innere Aufbau des Gehirns (II)

A7.

- Zeichne in das Bild der Gehirnscheibe (Abb. 5) den Schläfen- und Stirnklappen ein. Die App (→ 3D Gehirn) hilft dir dabei.
- Lies den Text M2 („Was ist eigentlich Alzheimer?“) und zeichne mithilfe der App (→ MRT und Phasen ...) die graue und weiße Substanz ein.
- Schaue dir nochmal den Hippocampus und die Ventrikel in der Abbildung 2 (Seite 3!) an und überlege wo diese im Bild der Gehirnscheibe (Abb. 5) sein könnten und zeichne sie ein. Überprüfe deine Lösung, indem du die App (→ MRT und Phasen ...) zur Hilfe nimmst.

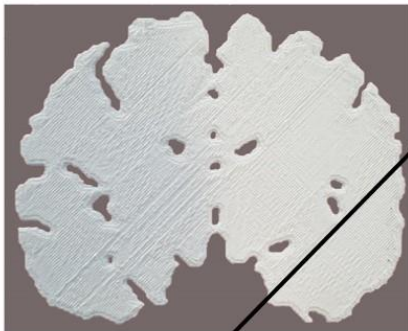


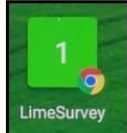
Abb. 5: Bild der Gehirnscheibe



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 7 „Innere Aufbau Gehirn“ auf dem Tablet!



Grüne Schrift: Nur für die Bearbeitung dieser Aufgabe wird mit dem Tablet gearbeitet. Ist keine grüne Schrift in der Aufgabenstellung, wird das Tablet nicht benötigt!



Rote Schrift: Bitte beantwortet die angegebene Umfrage mit LimeSurvey. Bitte stets an Gruppe und Kennung denken.

g in M2 und genau den B

Materialien mit der Bezeichnung MX sind in den lamierten Folien zu finden.



Sollten weitere Fragen oder Probleme auftreten, bitte jederzeit an mich wenden. (Herr Hoffmann)



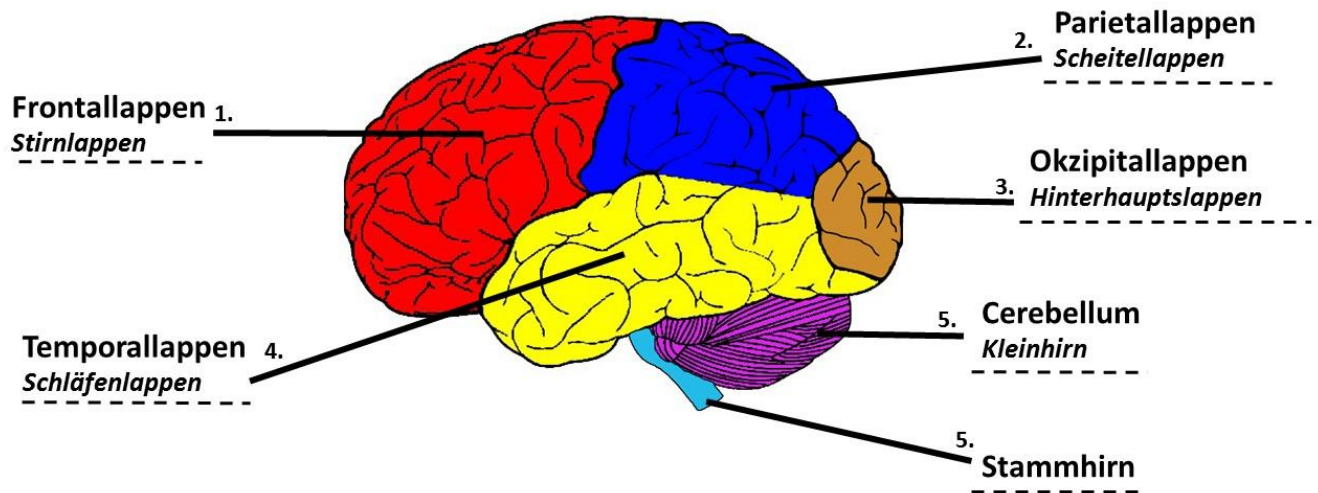
Gruppe B: Bitte an Umfrage nach Aufgabe 3 denken!

Video: Patientinneninterview

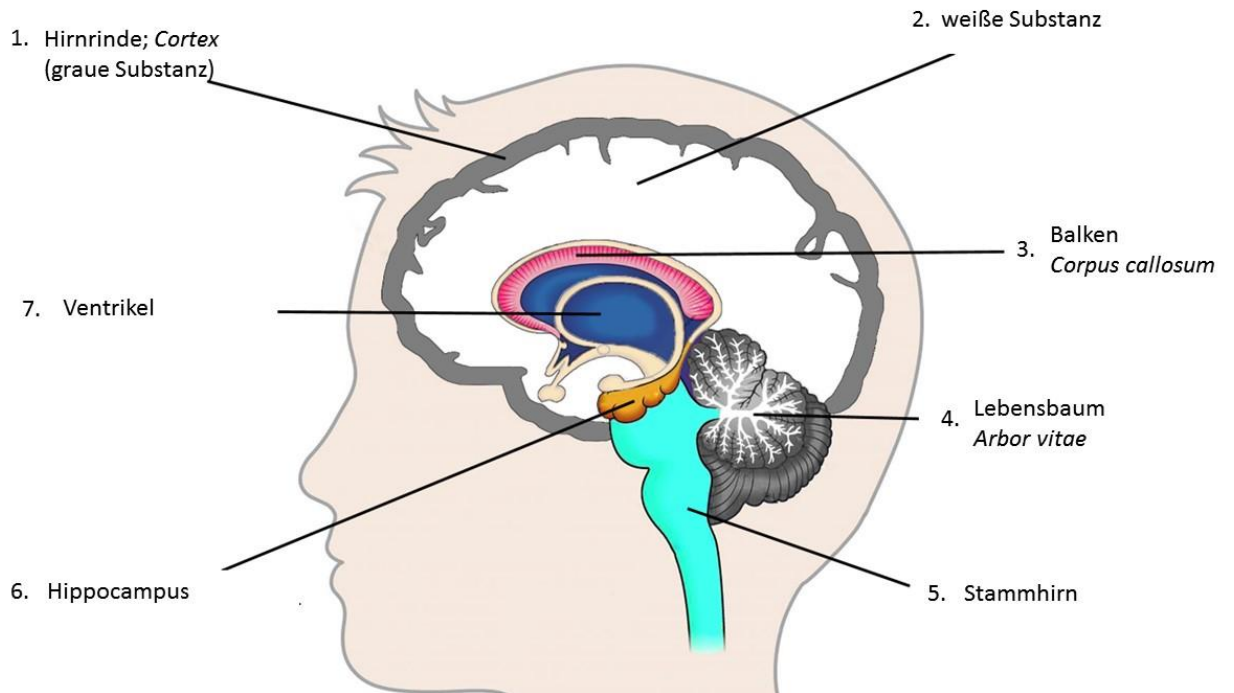


Aufgabe 2

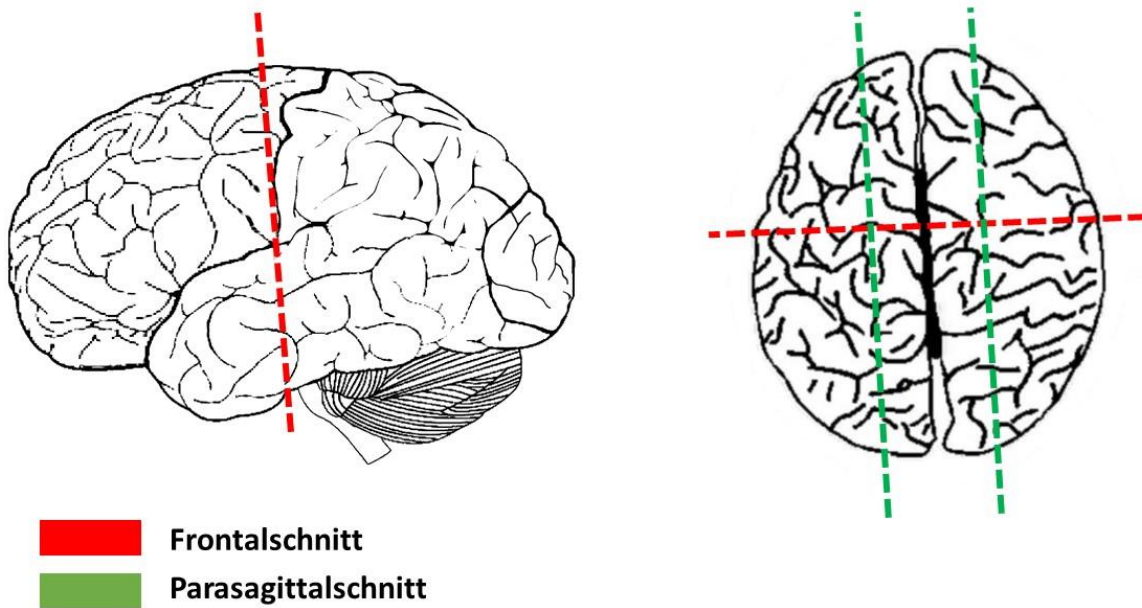
b) Aufteilung der Regionen durch: markante Hirnfurchen



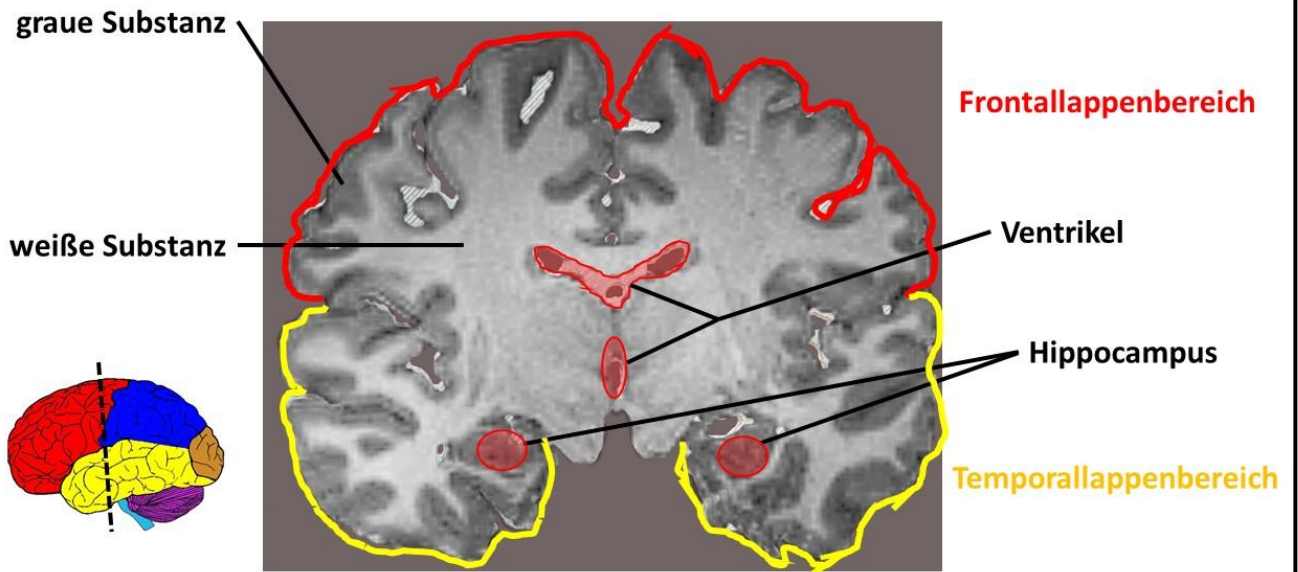
Aufgabe 3



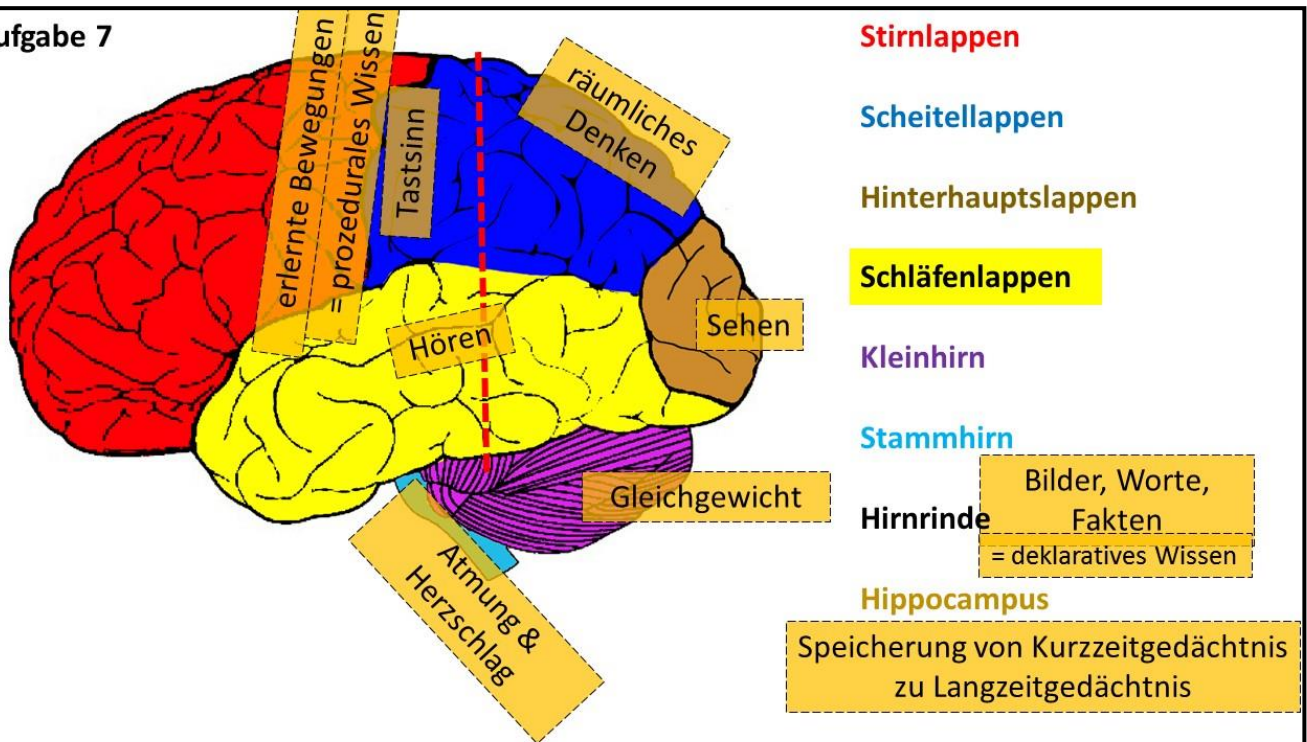
Aufgabe 4



Aufgabe 5 & 6



Aufgabe 7



Aufgabe 8

Gehirnregion	Aufgabe/Funktion	Krankheitsanzeichen	Beeinträchtigung vorhanden?	
			ja	nein
Okzipitallappen	Sehen	„Es ist keine Störung des Sehfeldes bekannt“		X
Temporallappen	Hören	„hört Dinge die nicht da sind“	X	
Frontallappen	Prozedurales Wissen (erlernte Bewegungen)	Den Gebrauch einzelner Gegenstände scheint sie nicht mehr zu Wissen“	X	
Parietallappen	Tastsinn Räumliche Wahrnehmung	Kein Hinweis	Kein Hinweis	Kein Hinweis
Cortex (graue Substanz)	Deklaratives Wissen (Bilder, Worte, Fakten)	Interview: vergessene Telefonnummer	X	
Cerebellum	Gleichgewicht, aufrechter Gang	„Der Gang ist ungestört, sie gebraucht ihre Hände gleich gut. Die Kniesehnenreflexe sind vorhanden.“		X
Stammhirn	Herzschlag & Atmung	Kein Hinweis	Kein Hinweis	Kein Hinweis
Hippocampus	Kurzzeitgedächtnis → Langzeitgedächtnis	„... zunehmende Gedächtnisschwäche“ Interview: Vergesslichkeit (Einkaufen; Bank)	X	

Aufgabe 9

Äußerer Vergleich gesundes und krankes Gehirn

Antwort: Bei dem kranken Gehirn sind die **Hirnfurchen breiter und tiefer.**

Aufgabe 10

Innerer Vergleich gesundes und krankes Gehirn

Temporallappenbereich:

Der Schläfenlappenbereich ist zurückgegangen/kleiner als vorher.
Viele, tiefe Hirnfurchen

Frontallappenbereich:

Der Stirnlappenbereich ist zurückgegangen/kleiner als vorher.
Viele, tiefe Hirnfurchen

Cortex (graue Substanz):

Über den gesamten Cortex hat die graue Substanz abgenommen.

Mark (weiße Substanz):

Die weiße Substanz hat sich nur leicht verändert.

Ventrikel:

Die Ventrikel sind vergrößert

Hippocampus:

Der Hippocampus ist so gut wie verschwunden.

Aufgabe 11

Krankheitsstadium	Pathologie des Gehirns	Symptome
<p>gesund</p> <p>↓</p> <p>frühe Demenzphase (Phase 1)</p>	<p>Hippocampus wird reduziert</p>	<ul style="list-style-type: none"> Fähigkeit sich neue Dinge zu merken sinkt → Lernschwäche neuere Informationen werden vergessen komplexe Aufgaben können nicht mehr erfüllt werden
<p>frühe Demenzphase (Phase 1)</p> <p>↓</p> <p>mittlere Demenzphase (Phase 2)</p>	<p>Abbau der grauen Substanz v.a. im Cortex</p> <p>Hippocampus wird weiter reduziert</p>	<ul style="list-style-type: none"> Einnerungen, die nicht lange zurückliegen, werden vergessen zum Teil werden Worte vergessen motorische Fähigkeiten gehen zurück räumliche und zeitliche Orientierung geht verloren
<p>mittlere Demenzphase (Phase 2)</p> <p>↓</p> <p>späte Demenzphase (Phase 3)</p>	<p>graue Substanz des Cortex wird massiv abgebaut und ist schließlich stark reduziert</p> <p>starke Erweiterung der Ventrikel auf Kosten des umgebenden Nervengewebes</p> <p>Hippocampus verschwindet</p>	<ul style="list-style-type: none"> Kommunikation kaum noch möglich Körperfunktionen sind beeinträchtigt Bewusstsein für Krankheit geht verloren Immobilität Tod

1.1.2 Lernheft A Sekundarstufe I

Gruppe A



Name: _____

Datum: _____

Klasse: _____

Das Interview

Stelle dir vor, du wärst der behandelnde Arzt der im Video gezeigten Patientinnen. Für eine Diagnose zu stellen, sollst du den Gesundheitszustand der Patientinnen kurz zusammenfassen.



Abb. 1: Interview zwischen Patientin und Arzt

A1. Beschreibe den Gesundheitszustand der Patientinnen, welche dir beim Betrachten des Videos aufgefallen sind.

Station 1 - Äußerer Aufbau Gehirn

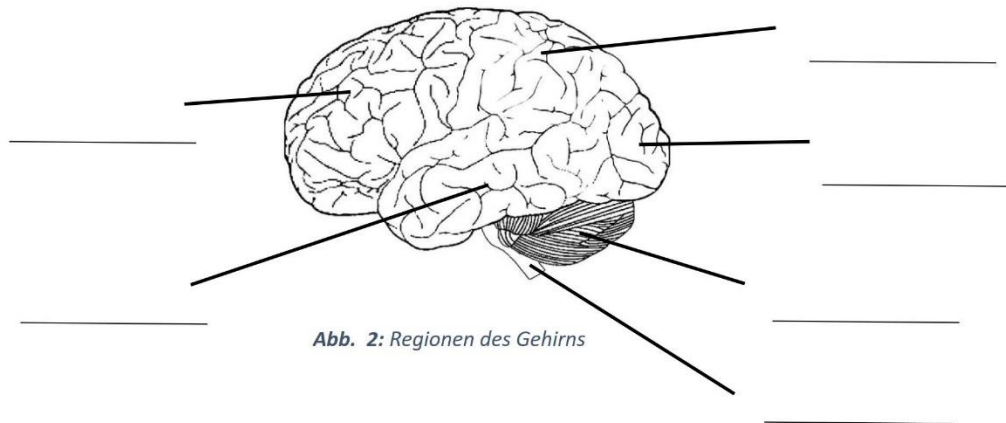
Information:

Die Natur hat im Laufe der Evolution viele faszinierende Entwicklungen hervorgebracht, allem voran das menschliche Gehirn, ohne welches wir die vielen verschiedenen Sinneseindrücke gar nicht wahrnehmen könnten. Das Gehirn wird auch als Schalt- bzw. Steuerzentrale des Menschen bezeichnet. Sämtliche Tätigkeiten, wie etwa das Sehen, Sprechen, Laufen, Essen, Schlafen, Lernen und noch vieles mehr werden von ihm gesteuert. Durch Nervenimpulse, welche über Nervenbahnen geleitet werden, empfängt es Informationen der peripheren Sinnesorgane und leitet Befehle an unsere Muskulatur.

A2. Wirft man einen genaueren Blick auf das Gehirn, so lassen sich anhand des äußeren Aufbaus verschiedene Regionen identifizieren.

- a) Betrachte dir mithilfe der App (→ **Aufgabe 2**) die einzelnen Regionen des Gehirns und fahre mit dem Finger deren Grenzen am Modell nach.
- b) Durch welche Strukturen erfolgt die Aufteilung in die einzelnen Regionen?

- c) Zeichne die Grenzen der Gehirnregionen in Abbildung 2 ein und benenne die Regionen.



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 2 „äußerer Aufbau Gehirn“ auf dem Tablet!

Station 2 – Innerer Aufbau Gehirn [I]

Zur anatomischen Beschreibung des menschlichen Körpers werden in der Wissenschaft verschiedene Schnittebenen verwendet (Abb 3). Schneidest du also ein Gehirn entlang der **Sagittalebene**, erhältst du eine rechte- und eine linke Gehirnhälfte. Um aber etwas von dem inneren Aufbau des Gehirns abbilden zu können, musst du etwas abseits der Sagittalebene das Gehirn schneiden. So ein Schnitt wird auch als **Parasagittalschnitt** (bed.: neben der Sagittalebene gelegen) bezeichnet.

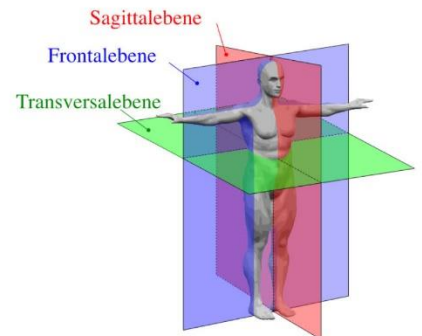


Abb.3: Anatomische Schnittebenen

A3. Benenne mit Hilfe von Material M1 die aufgezeigten Strukturen in Abbildung 4.

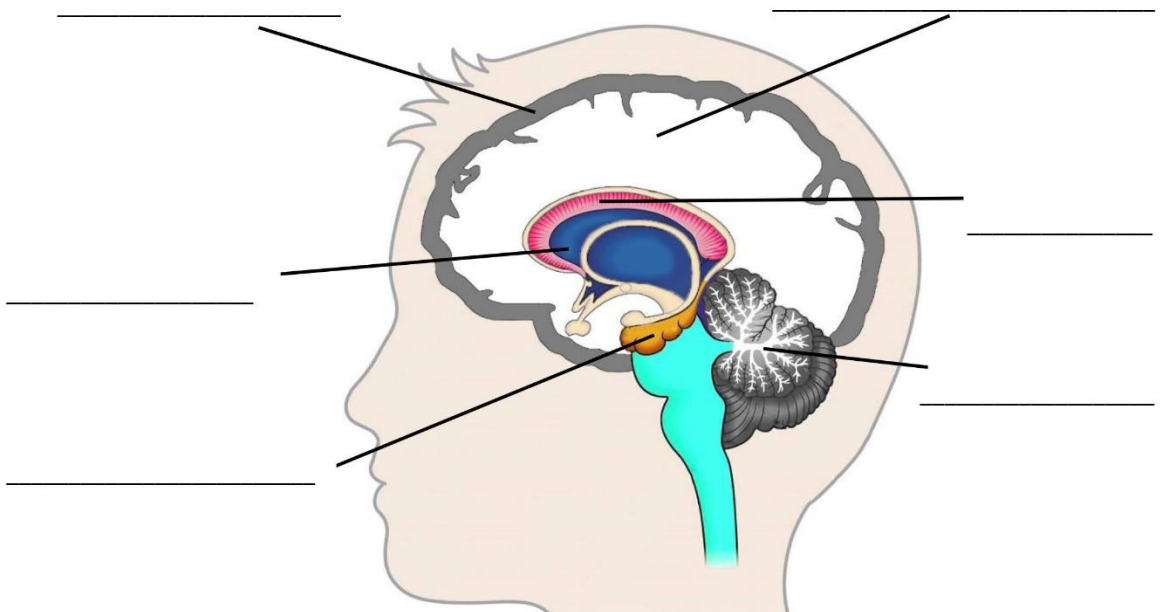


Abb. 4: Der innere Aufbau des Gehirns



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 3 „innerer Aufbau Gehirn“ auf dem Tablet!

Station 2 - Innerer Aufbau Gehirn [II]

Nicht nur **Sagittal-** und **Parasagittalschnitte** werden zur Betrachtung des Aufbaus herangezogen, sondern auch **Frontalschnitte**.

A4. Nutze die gesunde Gehirnscheibe und das Gehirnmodell (ohne es zu zerlegen!), um die richtige Position der Schnittebene (Frontalschnitt) herauszufinden.

- a) Zeichne die Schnittebene des **Frontalschnitts** mit je einem Strich in die Abbildung 5 und 6 ein!
- b) Zeichne außerdem die Schnittebene des **Parasagittalschnitts** (S. 3) in Abbildung 6 ein!

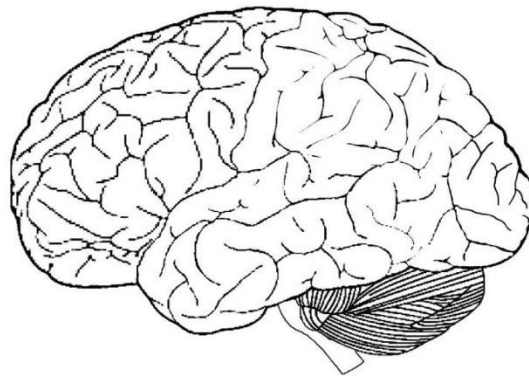


Abb. 5: Seitenansicht Gehirn; Schnittebene: Frontalschnitt

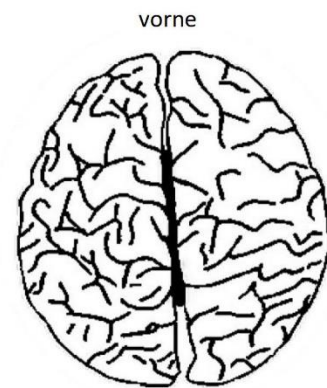


Abb. 6: Draufsicht Gehirn; Schnittebene Frontal- und Parasagittalschnitt

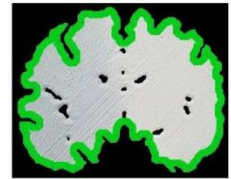


Beantworte die Umfrage: Aufgabe 4 „Schnittebenen“ auf dem Tablet!

Station 2 – Innerer Aufbau Gehirn [II]

A5. Nutze die Abbildung in M2 und das Bild der Gehirnscheibe (Abb. 7).

Zeichne außen entlang der **Hirnrinde** möglichst genau den Bereich des Stirnlobens und des Schläfenlobens in verschiedenen Farben nach!



markiert: Hirnrinde

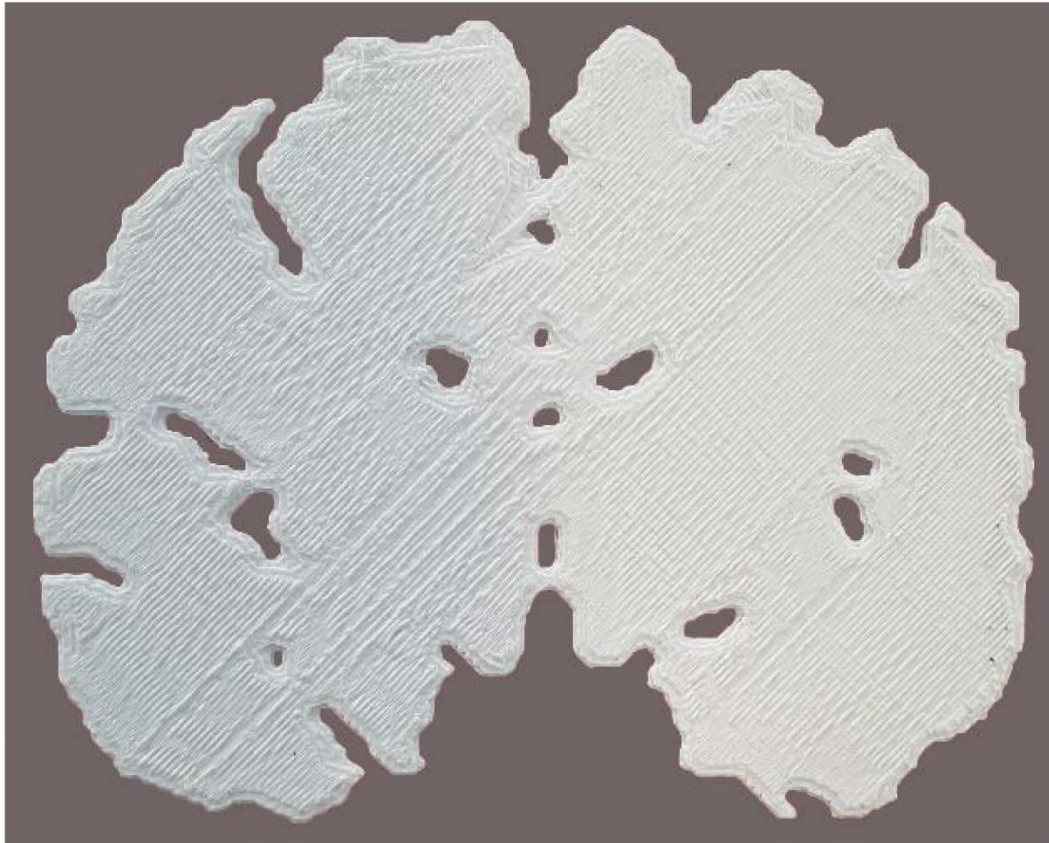


Abb. 7: Frontalschnitt gesundes Gehirn

A6. Stelle Vermutungen mithilfe von Aufgabe A3 (S. 3) auf, wo sich

- a) die Hippocampi und
- b) die Ventrikel befinden.

Überprüfe deine Vermutung, indem zu M4 zur Hilfe nimmst.
Zeichne diese ebenfalls in Abbildung 7 ein!



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 5/6 „innerer Aufbau Gehirn“ auf dem Tablet!

Station 3 – Die Funktionen der Gehirnregionen

A7. Ordne mithilfe der App (→ Aufgabe 7) und M5 den einzelnen Gehirnregionen in Tabelle 1 die entsprechende Funktion zu!

Gehirnregion	Aufgabe/Funktion	Krankheitsanzeichen	Beeinträchtigung vorhanden?	
			ja	nein
Hinterhauptslappen				
Schläfenlappen				
Stirnlappen				
Scheitellappen				
Hirnrinde	Deklaratives Wissen (Worte, Daten, Bilder, Fakten ...)	HIER STOPPI!		
Kleinhirn				
Stammhirn				
Hippocampus				

Tabelle 1: Gehirnregionen und ihre Funktionen

grauer Bereich ist für die Folgestunde!



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 7 „Funktionen des Gehirns“ auf dem Tablet!

Station 4 – Die Krankenakte

Jetzt wo wir wissen, dass bestimmte Gehirnregionen unterschiedliche Funktionen erfüllen, können wir über entsprechende Funktionsstörungen den wahrscheinlichen **krankheitsverursachenden Veränderungen** der Alzheimerdemenz auf den Grund gehen.

Aus dem Interview zwischen dem Arzt mit den Alzheimerpatientinnen sind dir bereits Auffälligkeiten des Gesundheitszustandes bekannt (vgl. Aufgabe 1). Zusätzlich hat der Arzt eine Krankenakte angelegt und weitere Auffälligkeiten festgehalten (M6).

A8.

- a) Ordne die Auffälligkeiten aus Aufgabe 1 (S. 1) und der Krankenakte M6 den wohl betroffenen Gehirnregionen in Tabelle 1 (S. 6) zu!
- b) Kreuze in der Spalte „*Beeinträchtigung vorhanden?*“ das richtige Kästchen an!

M6 | Notizen aus der Krankenakte

a) „keine Störung des Sehfeldes bekannt“	b) „kann einen Kugelschreiber nicht benennen“	e) „nimmt Geräusche und Stimmen wahr, obwohl niemand sonst im Haus ist.“
c) „kann eine dreiteilige Wortfolge (Auto-Ball-Zitrone) wiedergeben, aber nicht merken“	d) „Den Gebrauch einzelner Gegenstände scheint sie nicht mehr zu Wissen“	f) „Der Gang ist ungestört, sie gebraucht ihre Hände gleich gut. Die Kniesehnenreflexe sind vorhanden.“

Station 5 – Veränderungen des Gehirns

A9.

- a) Identifiziere das gesunde und erkrankte Gehirn anhand äußerlicher Veränderungen.
- b) Vergleiche beide Gehirnmodelle und beschreibe die äußeren Veränderungen des kranken Gehirns.



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 9 „äußerer Vergleich Gehirne“ auf dem Tablet!

A10. Betrachte dir nun mithilfe der App (→ **Aufgabe 10**) das MRT-Bild der erkrankten und gesunden Gehirnscheibe und vergleiche beide auf Veränderungen im Gehirn.

Gehe dabei auf die angegebenen Regionen ein!

Schläfenlappen:

Stirnlappen:

Hirnrinde (graue Substanz):

Mark (weiße Substanz):

Ventrikel:

Hippocampus:



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 10 „Vergleich MRT-Bilder“ auf dem Tablet!




Station 6 – Die Phasen der Alzheimerdemenz

Untersuchungen anderer Ärzte haben gezeigt, dass die Krankheit schrittweise in verschiedenen Phasen voranschreitet. Je weiter die Krankheit voranschreitet, desto mehr verändert sich auch das Gehirn.

A11. Betrachte dir nun die Abbildung in M7.

Beschreibe die strukturellen Veränderungen zwischen den einzelnen Phasen und gebe sie in der Spalte „Veränderungen im Gehirn“ in Tabelle 2 an!

Tabelle 2: Die Phasen der Alzheimerdemenz und auftretende Veränderungen

Krankheitsstadium	Veränderungen im Gehirn	Symptome
gesund  frühe Demenzphase (Phase 1)		
frühe Demenzphase (Phase 1)  mittlere Demenzphase (Phase 2)	HIER STOPPI!	
mittlere Demenzphase (Phase 2)  späte Demenzphase (Phase 3)		



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 11 „Phasen der Alzheimerkrankheit“ auf dem Tablet!

Station 6 – Die Phasen der Alzheimerdemenz

A12.

- a) **Fasse die Symptome der einzelnen Alzheimerdemenz-Phasen mithilfe von M8 in Tab. 2 (S. 9) zusammen!**

M8 | Diagnose Alzheimer – Die Krankheitsphasen

Phase 1 - Frühe Demenzphase

Das auffälligste Merkmal ist eine weiter zunehmende Lernschwäche. Verabredungen werden vergessen, ebenso Gesprächsinhalte oder Namen von Bekannten. Erinnerungen des Lebens bleiben vorhanden, aber die zeitliche Einordnung wird ungenau. Der Beruf kann nur selten noch ausgeübt werden und das Führen des Haushalts wird immer schwieriger. Die Betroffenen sind sich ihrer Schwächen bewusst.

Phase 2 - Mittlere Demenzphase

Aktuelle Eindrücke bleiben nur noch Augenblicke im Gedächtnis. Erinnerungen des mittleren Erwachsenenalters bis zur Jugend können noch gut abgerufen werden, aber Erinnerungen die nicht so lange zurückliegen gehen verloren. Beim Sprechen werden oft Worte gesucht oder Umschreibungen verwendet. Lesen können die betroffenen oft noch gut, aber der Inhalt des Gelesenen wird nicht richtig aufgefasst. Es tauchen Probleme beim Benutzen von Besteck auf. Alltägliche Aktivitäten erfordern Hilfestellung. Das Erkennen von Gesichtern und Gegenständen ist auch in Mitleidenschaft gezogen. Die Orientierung und das Bewusstsein für die Krankheit geht langsam verloren. Die Betroffenen müssen intensiv betreut werden.

Phase 3 - Späte Demenzphase

Die Sprache besteht nur noch aus wenigen Wörtern oder einfachen Sätzen. Einfachste Dinge, wie das Einnehmen von Mahlzeiten oder das Aufsuchen der Toilette, können nicht mehr alleine bewältigt werden. Die Betroffenen sind sich ihrer Krankheit nur noch zu wenigen Zeitpunkten bewusst. Zum Ende geht die Kontrolle der Körperhaltung und so auch die Mobilität verloren. Dann werden die Betroffenen bettlägerig und anfällig für Wundliegen und Infektionen. Die häufigste Todesursache ist eine Lungenentzündung.

- b) **In welcher Phase befinden sich die zwei Patientinnen aus dem Interview? Begründe!**

1.1.3 Lernheft B Sekundarstufe I

Gruppe B



Name: _____

Datum: _____

Kurs: _____

Das Interview

Stelle dir vor, du wärst der behandelnde Arzt der im Video gezeigten Patientinnen. Für eine Diagnose zu stellen, sollst du den Gesundheitszustand der Patientinnen kurz zusammenfassen.



Abb. 1: Interview zwischen Patientin und Arzt

A1. Beschreibe den Gesundheitszustand der Patientinnen, welche dir beim Betrachten des Videos aufgefallen sind.

Station 1 - Äußerer Aufbau Gehirn

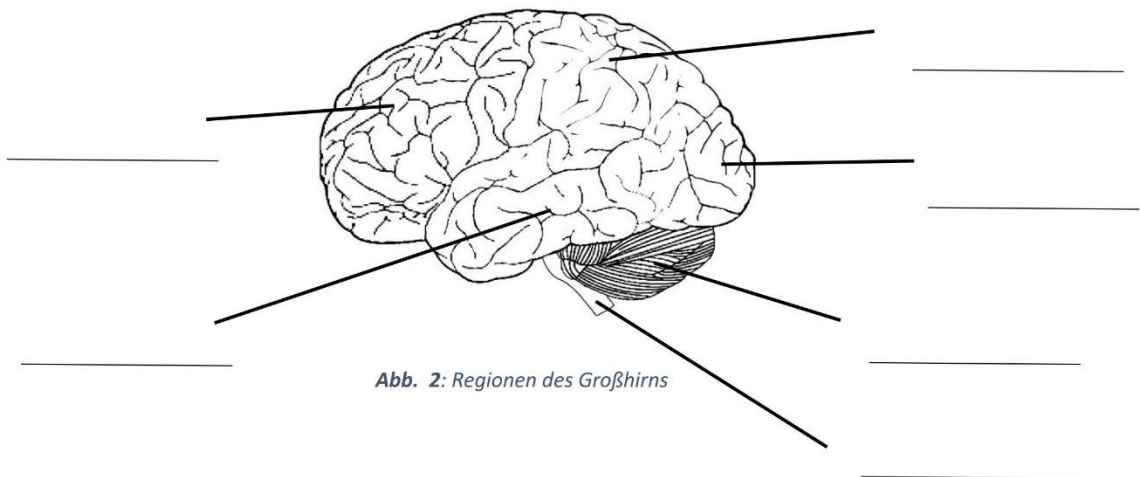
Information:

Die Natur hat im Laufe der Evolution viele faszinierende Entwicklungen hervorgebracht, allem voran das menschliche Gehirn, ohne welches wir die vielen verschiedenen Sinneseindrücke gar nicht wahrnehmen könnten. Das Gehirn wird auch als Schalt- bzw. Steuerzentrale des Menschen bezeichnet. Sämtliche Tätigkeiten, wie etwa das Sehen, Sprechen, Laufen, Essen, Schlafen, Lernen und noch vieles mehr werden von ihm gesteuert. Durch Nervenimpulse, welche über Nervenbahnen geleitet werden, empfängt es Informationen der peripheren Sinnesorgane und leitet Befehle an unsere Muskulatur.

A2. Wirft man einen genaueren Blick auf das Gehirn, so lassen sich anhand des äußeren Aufbaus verschiedene Regionen identifizieren.

- a) **Vergleiche die Abbildung aus M1 mit dem Gehirnmodell, indem du die farblich markierten Regionen am Modell identifizierst. Fahre mit einem Finger die Grenzen am Modell nach.**
- b) **Durch welche Strukturen erfolgt die Aufteilung in die einzelnen Regionen?**

- c) **Zeichne die Grenzen der Gehirnregionen in Abbildung 2 ein und benenne mithilfe von M2 die Gehirnregionen.**



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 2 „äußerer Aufbau Gehirn“ auf dem Tablet!

Station 2 – Innerer Aufbau Gehirn [I]

Zur anatomischen Beschreibung des menschlichen Körpers werden in der Wissenschaft verschiedene Schnittebenen verwendet (Abb 3). Schneidest du also ein Gehirn entlang der **Sagittalebene**, erhältst du eine rechte- und eine linke Gehirnhälfte. Um aber etwas von dem inneren Aufbau des Gehirns abbilden zu können, musst du etwas abseits der Sagittalebene das Gehirn schneiden. So ein Schnitt wird auch als **Parasagittalschnitt** (bed.: neben der Sagittalebene gelegen) bezeichnet.

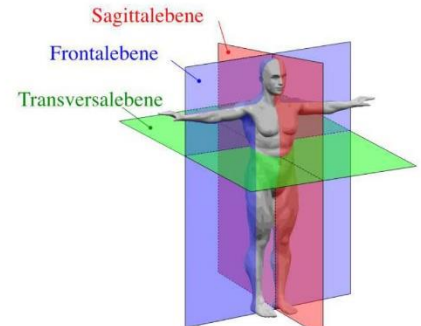


Abb.3: Anatomische Schnittebenen

A3. Benenne mit Hilfe von M3 die aufgezeigten Strukturen in Abbildung 4.

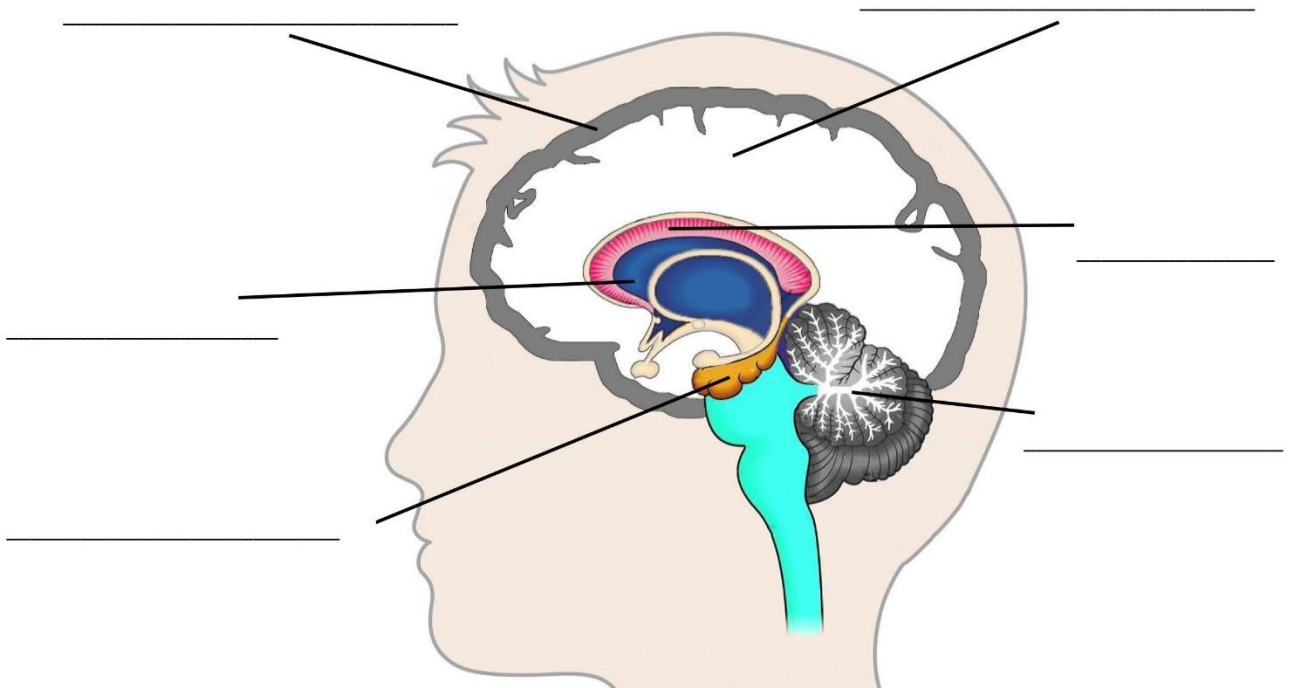


Abb. 4: Der innere Aufbau des Gehirns

Station 2 - Innerer Aufbau Gehirn [II]

Nicht nur **Sagittal- und Parasagittalschnitte** werden zur Betrachtung des Aufbaus herangezogen, sondern auch **Frontalschnitte**.

- A4.** Nutze die App (→ **Aufgabe 4**) und die gesunde Gehirnscheibe, um die richtige Position der Schnittebene (Frontalschnitt) herauszufinden.
- a) Zeichne die Schnittebene des **Frontalschnitts** mit je einem Strich in die Abbildung 5 und 6 ein!
 - b) Zeichne außerdem die Schnittebenen des **Parasagittalschnitts** (S. 3) in Abbildung 6 ein!

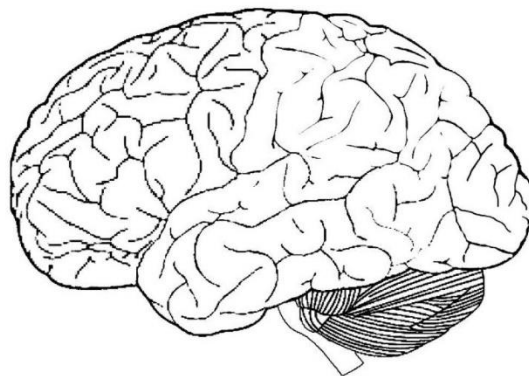


Abb. 5: Seitenansicht Gehirn; Schnittebene: Frontalschnitt

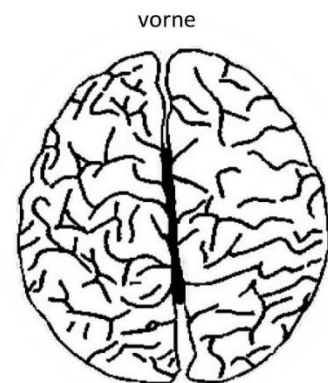


Abb.6: Draufsicht Gehirn; Schnittebene Frontal- und Parasagittalschnitt



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 4 „Schnittebenen“ auf dem Tablet!

Station 2 – Innerer Aufbau Gehirn [II]

A5. Nutze die App (→ **Aufgabe 5**) indem du die Kamera auf die folgende Abbildung richtest (Abb. 7).

Zeichne außen entlang der **Hirnrinde** möglichst genau den Bereich des Stirnlobens und des Schläfenlobens in verschiedenen Farben nach!

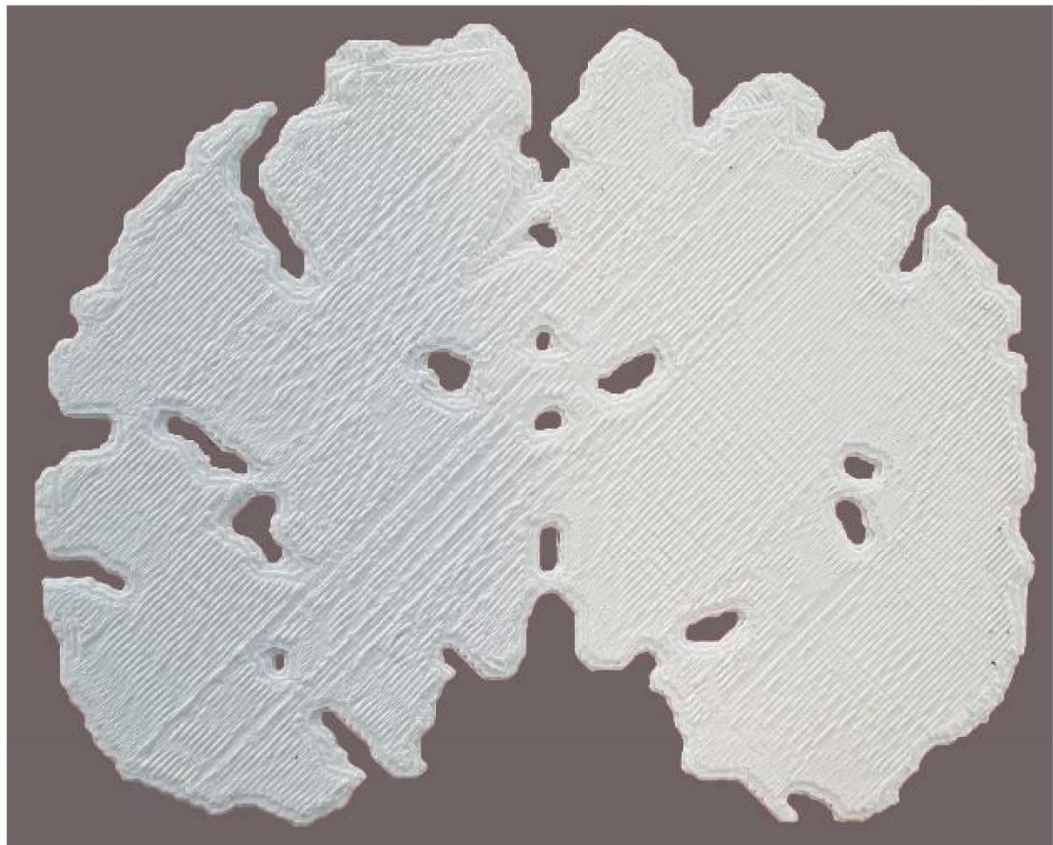
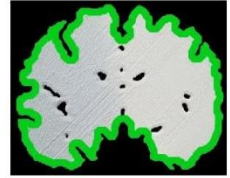


Abb. 7: Frontalschnitt gesundes Gehirn

A6. Stelle Vermutungen mithilfe von Aufgabe A3 (S. 3) auf, wo sich

- a) die Hippocampi und
- b) die Ventrikel befinden.

Überprüfe deine Vermutung durch Einblenden der Areale in der App (→ **Aufgabe 6**).
Zeichne diese ebenfalls in Abbildung 7 ein!



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 5/6 „innerer Aufbau Gehirn“ auf dem Tablet!

Station 3 – Die Funktionen der Gehirnregionen

A7. Lies den Text M4 und ordne den einzelnen Gehirnregionen in Tabelle 1 die entsprechende Funktion zu!

Gehirnregion	Aufgabe/Funktion	Krankheitsanzeichen	Beeinträchtigung vorhanden?	
			ja	nein
Hinterhauptslappen				
Schläfenlappen				
Stirnloben				
Scheitellappen		HIER STOPPI		
Hirnrinde	Deklaratives Wissen (Worte, Daten, Bilder, Fakten ...)			
Kleinhirn				
Stammhirn				
Hippocampus				

Tabelle 1: Gehirnregionen und ihre Funktionen

grauer Bereich ist für die Folgestunde!



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 7 „Funktionen des Gehirns“ auf dem Tablet!

Station 4 – Die Krankenakte

Jetzt wo wir wissen, dass bestimmte Gehirnregionen unterschiedliche Funktionen erfüllen, können wir über entsprechende Funktionsstörungen den wahrscheinlichen **krankheitsverursachenden Veränderungen** der Alzheimerdemenz auf den Grund gehen.

Aus dem Interview zwischen dem Arzt mit den Alzheimerpatientinnen sind dir bereits Auffälligkeiten des Gesundheitszustandes bekannt (vgl. Aufgabe 1). Zusätzlich hat der Arzt eine Krankenakte angelegt und weitere Auffälligkeiten festgehalten (M5).

A8.

- a) Ordne die Auffälligkeiten aus Aufgabe 1 (S. 1) und der Krankenakte (M5) den wohl betroffenen Gehirnregionen in Tabelle 1 (S. 6) zu!
- b) Kreuze in der Spalte „*Beeinträchtigung vorhanden?*“ das richtige Kästchen an!

M6 | Notizen aus der Krankenakte

a) "keine Störung des Sehfeldes bekannt"	b) "kann einen Kugelschreiber nicht benennen"	e) "nimmt Geräusche und Stimmen wahr, obwohl niemand sonst im Haus ist."
c) "kann eine dreiteilige Wortfolge (Auto-Ball-Zitrone) wiedergeben, aber nicht merken"	d) "Den Gebrauch einzelner Gegenstände scheint sie nicht mehr zu wissen"	f) "Der Gang ist ungestört, sie gebraucht ihre Hände gleich gut. Die Kniesehnenreflexe sind vorhanden."

Station 5 – Veränderungen des Gehirns

A9.

- a) Identifiziere das gesunde und erkrankte Gehirn anhand äußerlicher Veränderungen.
- b) Vergleiche beide Gehirnmodelle mithilfe der App (→ Aufgabe 9) und beschreibe die äußeren Veränderungen des kranken Gehirns.



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 9 „äußerer Vergleich Gehirne“ auf

A10. Betrachte dir nun in M6 das MRT-Bild der erkrankten und gesunden Person (Frontalschnitt) und vergleiche beide auf Veränderungen im Gehirn.

Gehe dabei auf die angegebenen Regionen ein!

Schläfenlappen:

Stirnlappen:

Hirnrinde (graue Substanz):

Mark (weiße Substanz):

Ventrikel:

Hippocampus:



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 10 „Vergleich MRT-Bilder“ auf dem Tablet!



Station 6 – Die Phasen der Alzheimerdemenz

Untersuchungen anderer Ärzte haben gezeigt, dass die Krankheit schrittweise in verschiedenen Phasen voranschreitet. Je weiter die Krankheit voranschreitet, desto mehr verändert sich auch das Gehirn.

A11. Betrachte dir nun mithilfe der App (→ [Aufgabe 11](#) die Rückseite (glattere Seite) der gesunden Gehirnscheibe.

Beschreibe die strukturellen Veränderungen zwischen den einzelnen Phasen und gebe sie in der Spalte „Veränderungen im Gehirn“ in Tabelle 2 an!

Tabelle 2: Die Phasen der Alzheimerdemenz und auftretende Veränderungen

Krankheitsstadium	Veränderungen im Gehirn	Symptome
gesund  frühe Demenzphase (Phase 1)		
frühe Demenzphase (Phase 1)  mittlere Demenzphase (Phase 2)		
mittlere Demenzphase (Phase 2)  späte Demenzphase (Phase 3)		

HIER STOPP!



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 11 „Phasen der Alzheimerkrankheit“ auf dem Tablet!

Station 6 – Die Phasen der Alzheimerdemenz

A12.

- a) **Fasse die Symptome der einzelnen Alzheimerdemenz-Phasen mithilfe von M7 in Tab. 2 zusammen!**

M7| Diagnose Alzheimer – Die Krankheitsphasen

Phase 1 - Frühe Demenzphase

Das auffälligste Merkmal ist eine weiter zunehmende Lernschwäche. Verabredungen werden vergessen, ebenso Gesprächsinhalte oder Namen von Bekannten. Erinnerungen des Lebens bleiben vorhanden, aber die zeitliche Einordnung wird ungenau. Der Beruf kann nur selten noch ausgeübt werden und das Führen des Haushalts wird immer schwieriger. Die Betroffenen sind sich ihrer Schwächen bewusst.

Phase 2 - Mittlere Demenzphase

Aktuelle Eindrücke bleiben nur noch Augenblicke im Gedächtnis. Erinnerungen des mittleren Erwachsenenalters bis zur Jugend können noch gut abgerufen werden, aber Erinnerungen die nicht so lange zurückliegen gehen verloren. Beim Sprechen werden oft Worte gesucht oder Umschreibungen verwendet. Lesen können die betroffenen oft noch gut, aber der Inhalt des Gelesenen wird nicht richtig aufgefasst. Es tauchen Probleme beim Benutzen von Besteck auf. Alltägliche Aktivitäten erfordern Hilfestellung. Das Erkennen von Gesichtern und Gegenständen ist auch in Mitleidenschaft gezogen. Die Orientierung und das Bewusstsein für die Krankheit geht langsam verloren. Die Betroffenen müssen intensiv betreut werden.

Phase 3 - Späte Demenzphase

Die Sprache besteht nur noch aus wenigen Wörtern oder einfachen Sätzen. Einfachste Dinge, wie das Einnehmen von Mahlzeiten oder das Aufsuchen der Toilette, können nicht mehr alleine bewältigt werden. Die Betroffenen sind sich ihrer Krankheit nur noch zu wenigen Zeitpunkten bewusst. Zum Ende geht die Kontrolle der Körperhaltung und so auch die Mobilität verloren. Dann werden die Betroffenen bettlägerig und anfällig für Wundliegen und Infektionen. Die häufigste Todesursache ist eine Lungenentzündung.

- b) **In welcher Phase befinden sich die zwei Patientinnen aus dem Interview? Begründe!**

1.1.4 Material A Sekundarstufe I

M1 | Der innere Aufbau des Gehirns

Das Gehirn besteht aus zwei Hälften, die durch den sogenannten Balken miteinander verbunden sind. 80 Prozent der Hirnmasse entfallen auf das Großhirn.

Das Großhirn besitzt eine äußere Schicht, die als Hirnrinde bezeichnet wird. Die Hirnrinde besteht vornehmlich aus *grauer Substanz*. Diese wird der innenliegenden *weißen Substanz* gegenübergestellt. Beide lassen sich aufgrund ihrer charakteristischen Färbung sehr gut im MRT-Bild betrachten. Die graue Substanz besteht vornehmlich aus Nervenzellkörpern, die bspw. Kerngebiete darstellen. Die weiße Substanz besteht

vornehmlich aus Nervenfasern, deren typische sichtbare Färbung durch umhüllende Myelinscheiden entsteht. Die markante Verästelung der weißen Substanz im Kleinhirn wird sinnbildlich als Lebensbaum bezeichnet. Im Inneren des Gehirns – umgeben von weißer Substanz – liegen mit Hirnwasser gefüllte Hohlräume: die sogenannten *Ventrikel*. Ebenfalls im inneren des Gehirns liegt das limbische System. Der dazugehörige *Hippocampus* gilt als wesentliche Schaltzentrale des Gehirns. Hier fließen Informationen verschiedener sensorischer Systeme zusammen, die verarbeitet und von dort zur Hirnrinde zurückgesandt werden.

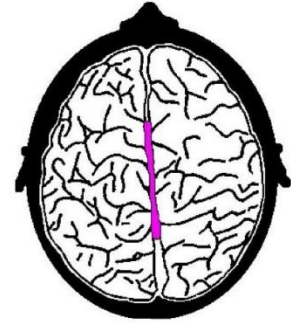
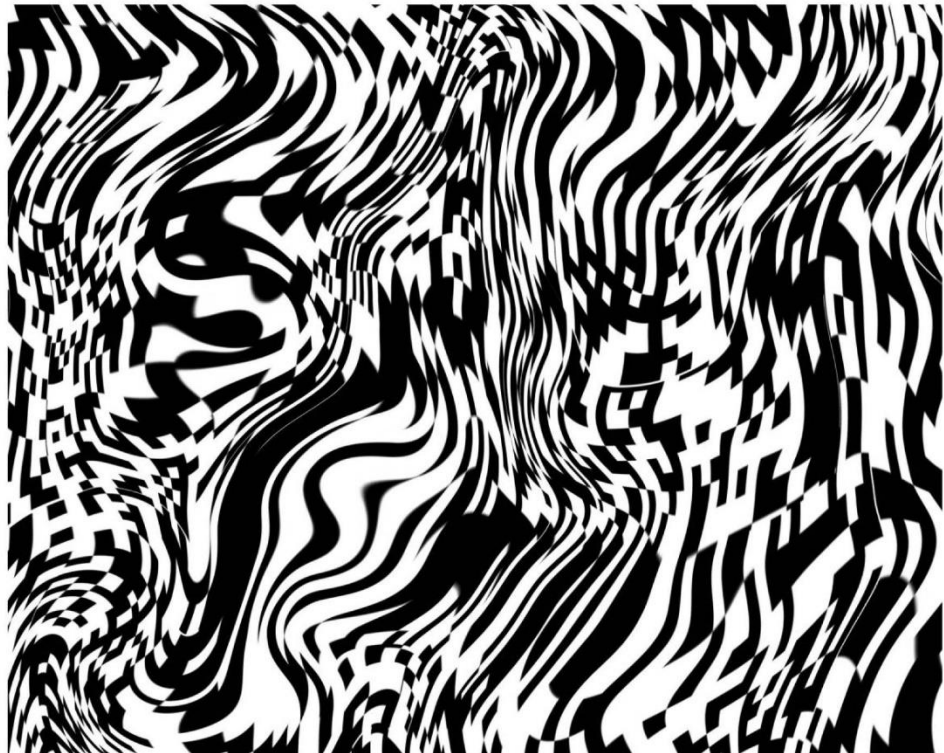
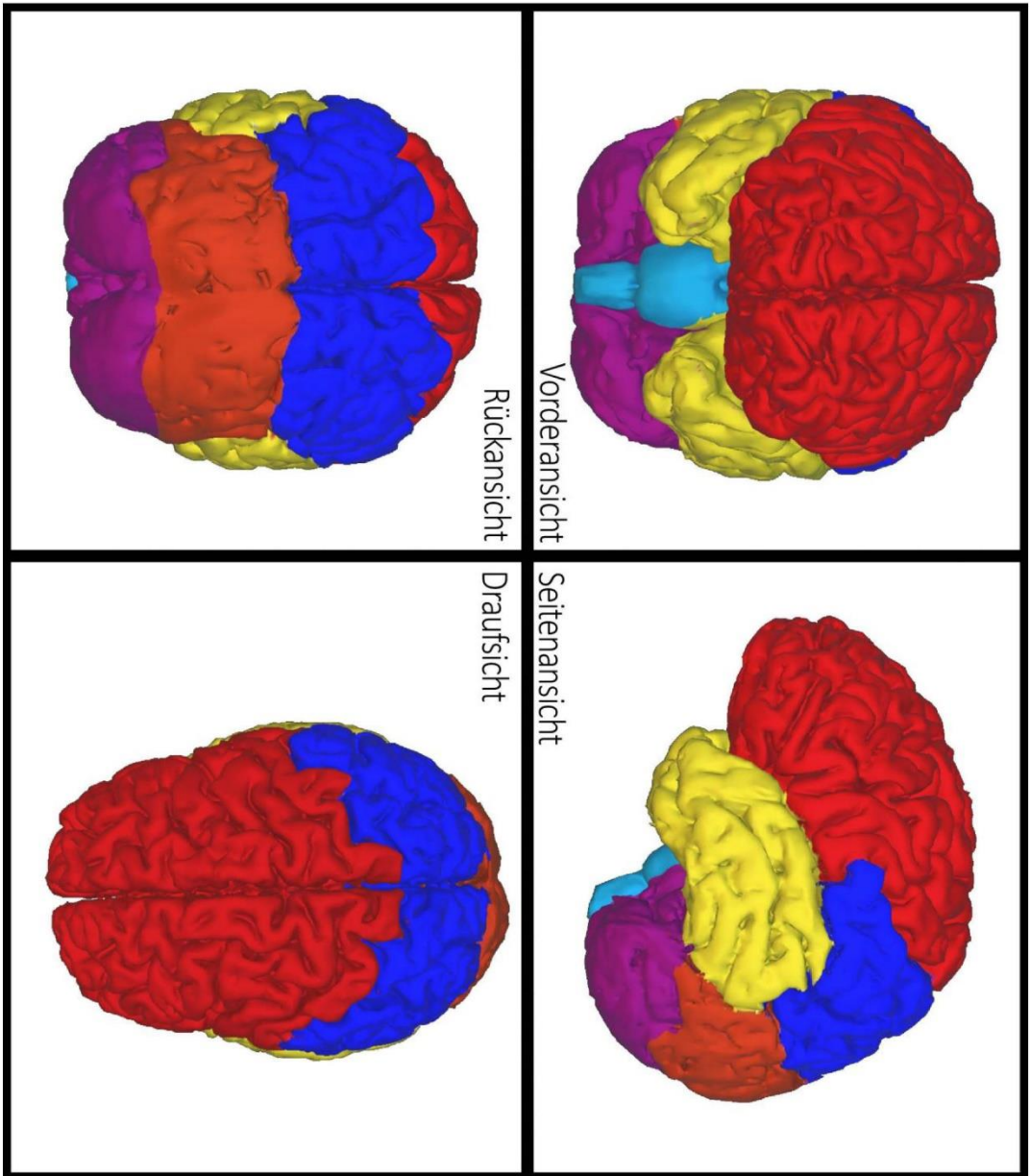


Abb. A: Draufsicht Gehirn; rosa eingefärbt: Balken

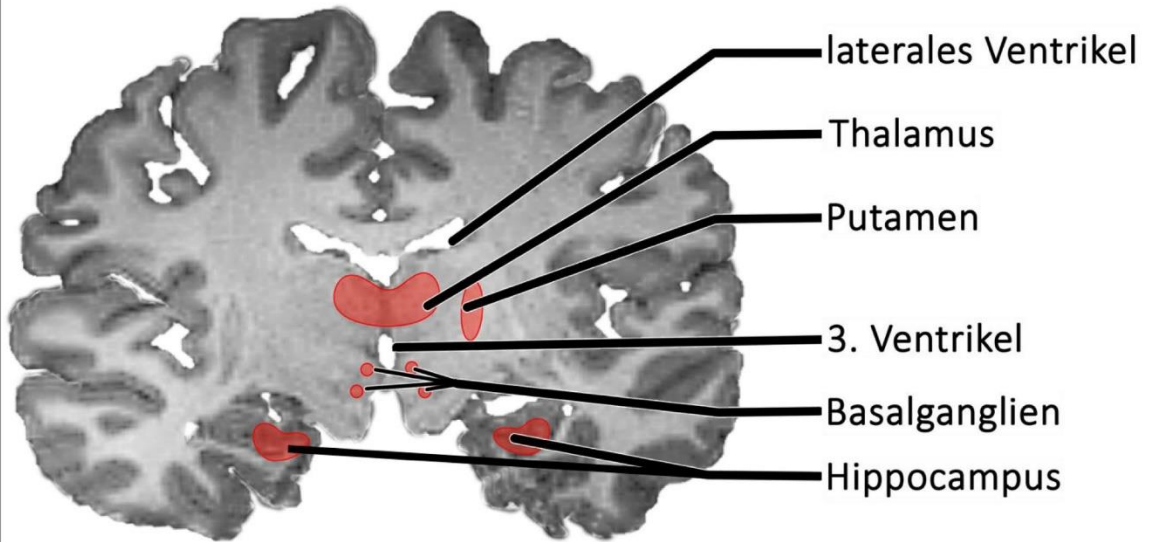
M5 | „Triggerbild“: Funktionen & Aufgaben des Gehirns



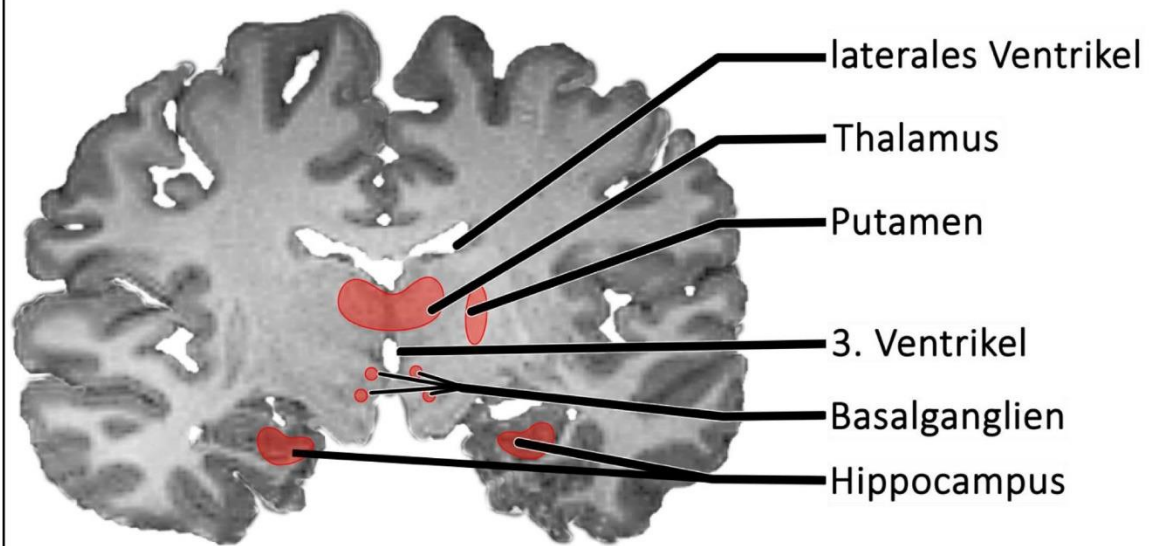
M2 | Regionen des Gehirns: verschiedene Ansichten



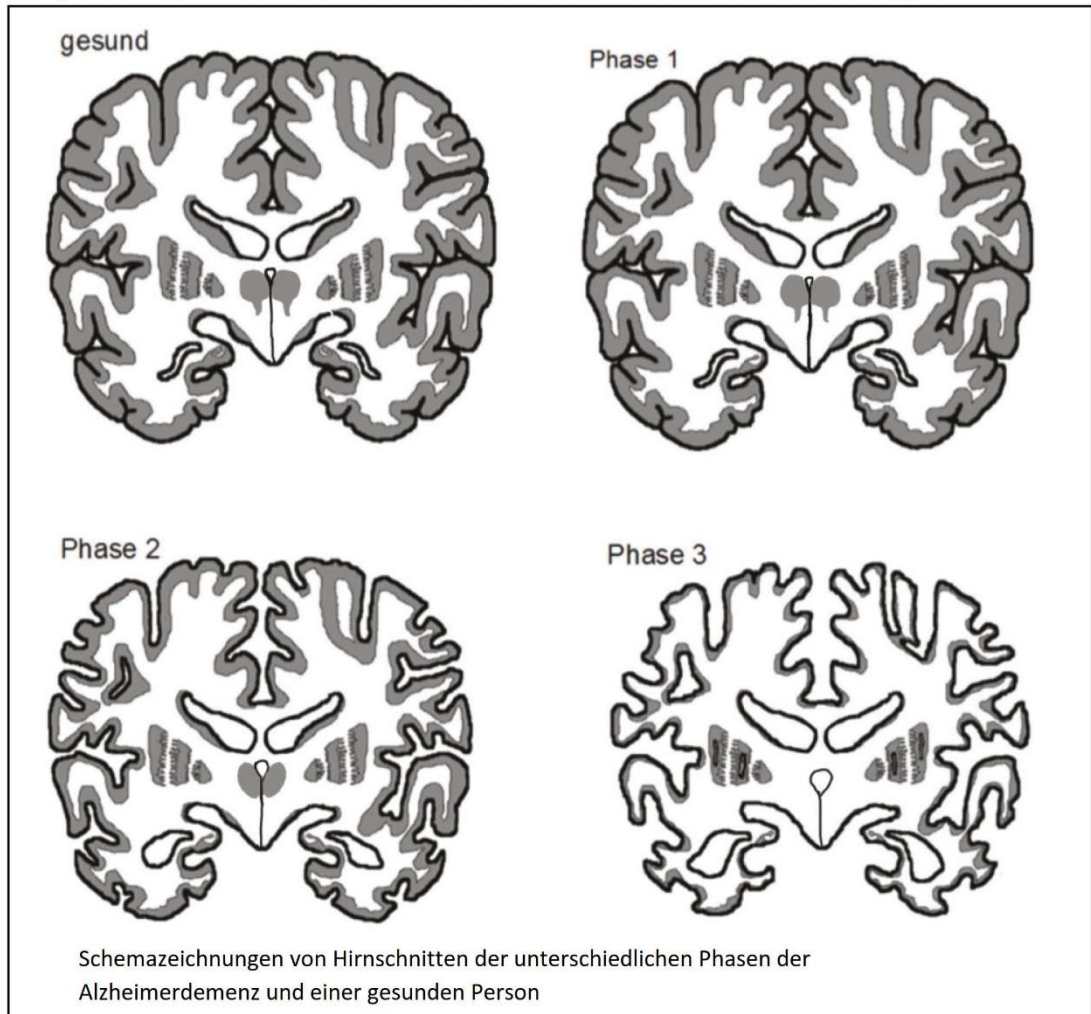
M4 | MRT-Bild; Medialer Frontalschnitt: Ventrikel und Hippocampus



M4 | MRT-Bild; Medialer Frontalschnitt: Ventrikel und Hippocampus

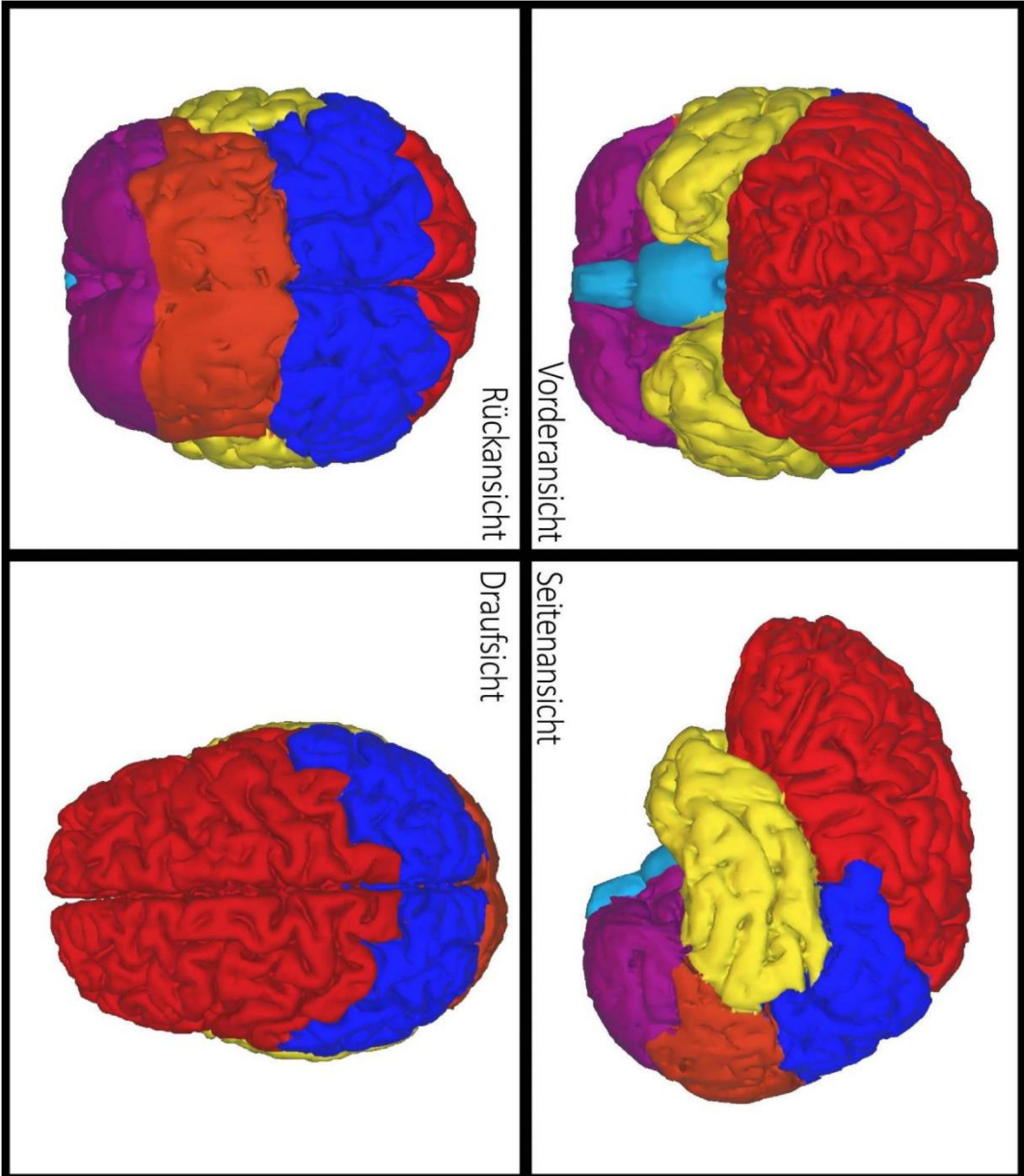


M7 | Die Phasen der Alzheimerdemenz und auftretende Veränderungen



1.1.5 Material B Sekundarstufe I

M1 | Regionen des Gehirns: verschiedene Ansichten



M2 | Die Regionen des Gehirns

Das Großhirn wird sehr stark von seinen optisch auffälligen Windungen, Spalten und Furchen geprägt. Das Gehirn lässt sich in verschiedene Regionen aufteilen: Der Stirnlappen ist die Größte der vier Großhirnregionen und liegt, wie der Name bereits vermuten lässt, im vorderen Bereich des Großhirns. Unmittelbar dahinter, im oberen und mittleren Bereich, schließt sich der Scheitellappen an. Unterhalb des Stirn- und Scheitellappens befinden sich seitlich die Schläfenlappen. Die vierte und letzte Region des Großhirns, der Hinterhauptslappen befindet sich am Hinterkopf, oberhalb des Kleinhirns. Das Stammhirn ist mit dem Groß- und Kleinhirn verbunden.

M3 | Der innere Aufbau des Gehirns

Das Gehirn besteht aus **zwei Hälften**, die durch den sogenannten Balken miteinander verbunden sind. **80 Prozent** der Hirnmasse entfallen auf das Großhirn.

Das Großhirn besitzt eine äußere Schicht, die als Hirnrinde bezeichnet wird. Die Hirnrinde besteht vornehmlich aus *grauer Substanz*. Diese wird der innenliegenden *weißen Substanz* gegenübergestellt. Beide lassen sich aufgrund ihrer charakteristischen Färbung sehr gut im MRT-Bild betrachten. Die graue Substanz besteht vornehmlich aus Nervenzellkörpern, die bspw. Kerngebiete darstellen. Die weiße Substanz besteht vornehmlich aus Nervenfasern, deren typische sichtbare Färbung durch umhüllende Myelinscheiden entsteht. Die markante Verästelung der weißen Substanz im Kleinhirn wird sinnbildlich als Lebensbaum bezeichnet. Im Inneren des Gehirns – umgeben von weißer Substanz – liegen mit Hirnwasser gefüllte Hohlräume: die sogenannten *Ventrikel*. Ebenfalls im inneren des Gehirns liegt das limbische System. Der dazugehörige *Hippocampus* gilt als wesentliche Schaltzentrale des Gehirns. Hier fließen Informationen verschiedener sensorischer Systeme zusammen, die verarbeitet und von dort zur Hirnrinde zurückgesandt werden.

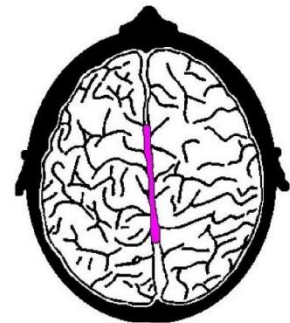


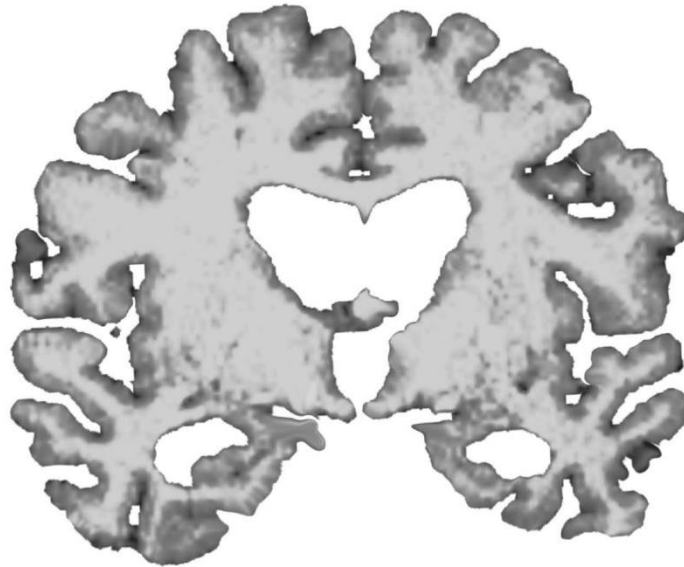
Abb. A: Draufsicht Gehirn; rosa eingefärbt: Balken

M4| Aufgaben des Gehirns

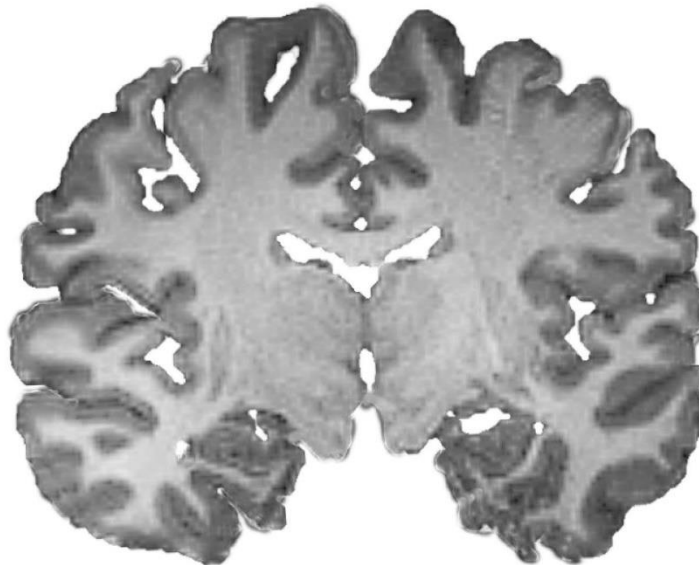
Jedem Bereich des Gehirns können spezifische Aufgaben zugeteilt werden, für die er zuständig ist. In der Rinde des *Hinterhauptslappen* liegt bspw. das Sehzentrum, in der Rinde der Schläfenlappen das Hörzentrum. In diesen Bereichen münden die Nerven, die von Augen und Ohren kommen. Erlernete Bewegungen und Bewegungsabfolgen wie Tanzen oder Jonglieren werden als prozedurales Wissen (Prozess = Ablauf) bezeichnet. Dieses wird im *hinteren Teil des Stirnlappens* gespeichert. Während der *vordere Teil des Scheitellappens* Sinneswahrnehmungen wie Tastsinn (Druck, Vibration) verarbeitet, findet dort im oberen Teil räumliches Denken statt wie z.B. die Wahrnehmung der Lage der Körperteile im Raum. Erinnerungen an Bilder, Fakten, Worte und vieles mehr werden über die gesamte Hirnrinde verstreut gespeichert. Dieses Wissen wird als deklaratives (=beschreibbares) Wissen bezeichnet, da man es mit Worten erklären

und beschreiben kann. Gut untersucht und allgemein anerkannt ist die Rolle des Kleinhirns für Planung, Koordination und Feinabstimmung von Bewegungen. Der Hirnstamm ist für die essenziellen Lebensfunktionen zuständig wie die Steuerung der Herzfrequenz, des Blutdrucks und der Atmung. Zudem ist er für wichtige Reflexe wie den Lidschluss-, Schluck- und Husten-Reflex verantwortlich. Auch der Schlaf und die verschiedenen Schlaf- und Traumphasen werden hier kontrolliert. Der Hippocampus, als Teil des limbischen Systems, gilt als wesentliche Schaltzentrale des Gehirns. Hier fließen Informationen verschiedener sensorischer Systeme zusammen, die verarbeitet und von dort zur Hirnrinde zurückgesandt werden. Damit ist der Hippocampus enorm wichtig für die Gedächtniskonsolidierung, also die Überführung von Gedächtnisinhalten aus dem Kurzzeit- in das Langzeitgedächtnis.

M6 | MRT Bild einer kranken- und gesunden Person (Frontalschnitt)



MRT-Bild einer kranken Person



MRT-Bild einer gesunden Person

1.1.6 Lernheft A Sekundarstufe II

Gruppe A



Name: _____

Datum: _____

Klasse: _____

Das Interview

Stelle dir vor, du wärst der behandelnde Arzt der im Video gezeigten Patientinnen. Für eine Diagnose zu stellen, sollst du die Symptomatik der Patientinnen kurz zusammenfassen.



Abb. 1: Interview zwischen Patientin und Arzt

A1. Beschreibe die Symptome der Patientinnen, welche dir beim Betrachten des Videos aufgefallen sind.

Station 1 - Äußere Neuroanatomie

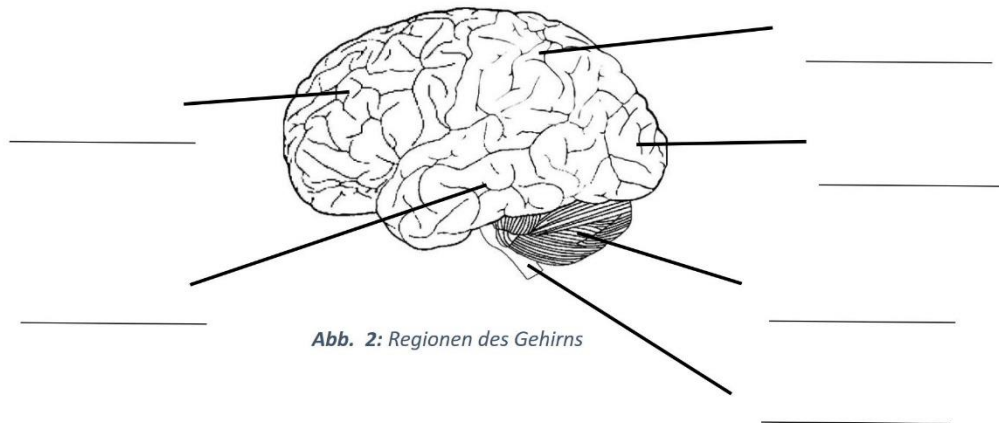
Information:

Die Natur hat im Laufe der Evolution viele faszinierende Entwicklungen hervorgebracht, allem voran das menschliche Gehirn, ohne welches wir die vielen verschiedenen Sinneseindrücke gar nicht wahrnehmen könnten. Das Gehirn wird auch als Schalt- bzw. Steuerzentrale des Menschen bezeichnet. Sämtliche Tätigkeiten, wie etwa das Sehen, Sprechen, Laufen, Essen, Schlafen, Lernen und noch vieles mehr werden von ihm gesteuert. Durch Nervenimpulse, welche über Nervenbahnen geleitet werden, empfängt es Informationen der peripheren Sinnesorgane und leitet Befehle an unsere Muskulatur.

A2. Wirft man einen genaueren Blick auf das Gehirn, so lassen sich anhand der äußeren Anatomie verschiedene Regionen identifizieren.

- a) Betrachte dir mithilfe der App (→ **Aufgabe 2**) die einzelnen Regionen des Gehirns und fahre mit dem Finger deren Grenzen am Modell nach.
- b) Durch welche Strukturen erfolgt die Aufteilung in die einzelnen Regionen?

- c) Zeichne die Grenzen der Gehirnregionen in Abbildung 2 ein und benenne die Regionen.



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 2 „äußerer Aufbau Gehirn“ auf dem Tablet!

Station 2 - Innere Neuroanatomie [I]

Zur anatomischen Beschreibung des menschlichen Körpers werden in der Wissenschaft verschiedene Schnittebenen verwendet (Abb 3). Schneidest du also ein Gehirn entlang der **Sagittalebene**, erhältst du eine rechte- und eine linke Gehirnhälfte. Um aber etwas von dem inneren Aufbau des Gehirns abbilden zu können, musst du etwas abseits der Sagittalebene das Gehirn schneiden. So ein Schnitt wird auch als **Parasagittalschnitt** (bed.: neben der Sagittalebene gelegen) bezeichnet.

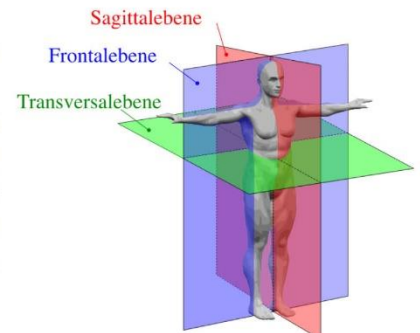


Abb.3: Anatomische Schnittebenen

A3. Benenne mit Hilfe von Material M1 die aufgezeigten Strukturen in Abbildung 4.

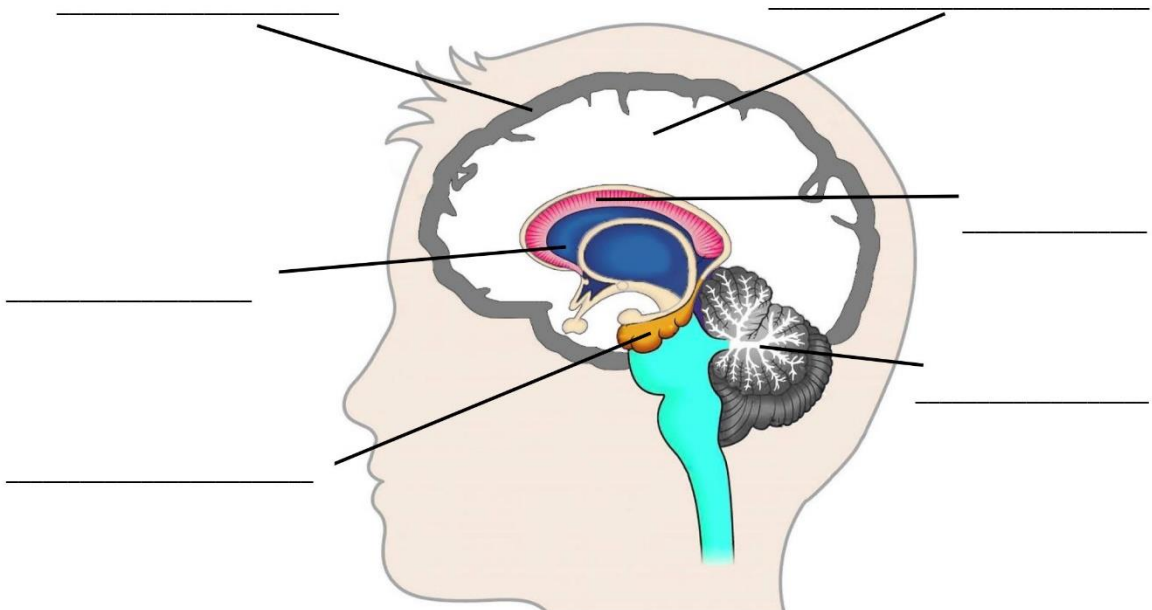


Abb. 4: Der innere Aufbau des Gehirns



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 3 „innerer Aufbau Gehirn“ auf dem Tablet!

Station 2 - Innere Neuroanatomie [II]

Nicht nur **Sagittal- und Parasagittalschnitte** werden zur Betrachtung des Aufbaus herangezogen, sondern auch **Frontalschnitte**.

A4. Nutze die gesunde Gehirnscheibe und das Gehirnmodell (ohne es zu zerlegen!), um die richtige Position der Schnittebene (Frontalschnitt) herauszufinden.

- a) Zeichne die Schnittebene des **Frontalschnitts** mit je einem Strich in die **Abbildung 5 und 6** ein!
- b) Zeichne außerdem die Schnittebene des **Parasagittalschnitts** (S. 3) in **Abbildung 6** ein!

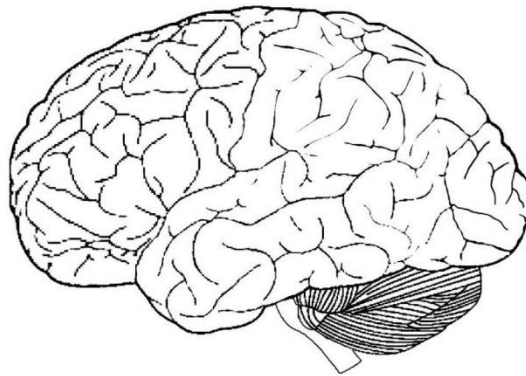


Abb. 5: Seitenansicht Gehirn; Schnittebene: Frontalschnitt

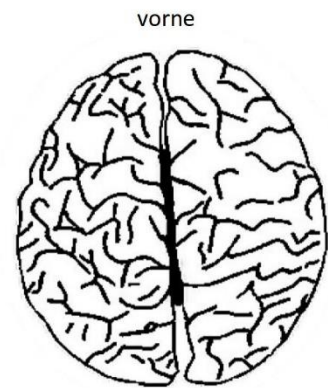


Abb. 6: Draufsicht Gehirn; Schnittebene Frontal- und Parasagittalschnitt

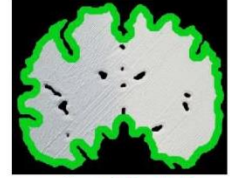


Beantworte die Umfrage: Aufgabe 4 „Schnittebenen“ auf dem Tablet!

Station 2 – Innere Neuroanatomie [II]

A5. Nutze die Abbildung in M2 und das Bild der Gehirnscheibe (Abb. 7).

Zeichne außen entlang der **Hirnrinde** möglichst genau den Bereich des Stirnlappons und des Schläfenlappons in verschiedenen Farben nach!



markiert: *Hirnrinde*

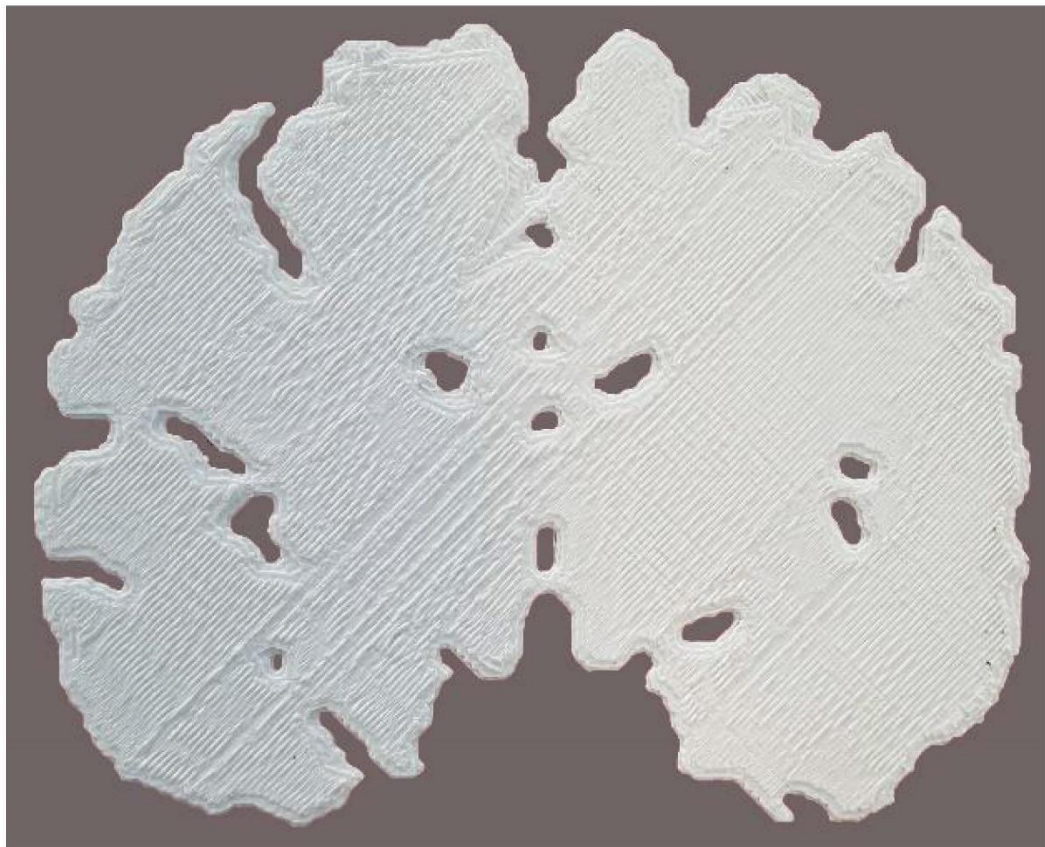


Abb. 7: Frontalschnitt gesundes Gehirn

A6. Stelle Vermutungen mithilfe von Aufgabe A3 (S. 3) auf, wo sich

- die Hippocampi und
- die Ventrikel befinden.

Überprüfe deine Vermutung, indem zu M4 zur Hilfe nimmst.
Zeichne diese ebenfalls in Abbildung 7 ein!



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 5/6 „innerer Aufbau Gehirn“ auf dem Tablet!

Station 3 – Funktionale Neuroanatomie

A7. Ordne mithilfe der App (→ Aufgabe 7) und M5 den einzelnen Gehirnregionen in Tabelle 1 die entsprechende Funktion zu!

Gehirnregion	Aufgabe/Funktion	Krankheitsanzeichen	Beeinträchtigung vorhanden?	
			ja	nein
Okzipitallappen				
Temporallappen				
Frontallappen				
Parietallappen		HIER STOPPI!		
Cortex	Deklaratives Wissen (Worte, Daten, Bilder, Fakten ...)			
Cerebellum				
Stammhirn				
Hippocampus				

Tabelle 1: Gehirnregionen und ihre Funktionen

grauer Bereich ist für die Folgestunde!



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 7 „Funktionen des Gehirns“ auf dem Tablet!

Station 4 – Die Krankenakte

Jetzt wo wir wissen, dass bestimmte Gehirnregionen unterschiedliche Funktionen erfüllen, können wir über entsprechende Funktionsstörungen den wahrscheinlichen **pathogenen Veränderungen** der Alzheimerdemenz auf den Grund gehen.

Aus dem Interview zwischen dem Arzt mit den Alzheimerpatientinnen ist dir bereits deren Symptomatik bekannt (vgl. Aufgabe 1). Zusätzlich hat der Arzt eine Krankenakte angelegt und weitere Symptome festgehalten (M6).

A8.

- a) Ordne die Symptome aus Aufgabe 1 (S. 1) und der Krankenakte M6 den wohl betroffenen Gehirnregionen in Tabelle 1 (S. 6) zu!
- b) Kreuze in der Spalte „*Beeinträchtigung vorhanden?*“ das richtige Kästchen an!

M6 | Notizen aus der Krankenakte

a) „keine Störung des Sehfeldes bekannt“

b) „kann einen Kugelschreiber nicht benennen“

c) „kann eine dreiteilige Wortfolge (Auto-Ball-Zitrone) wiedergeben, aber nicht merken“

d) „Den Gebrauch einzelner Gegenstände scheint sie nicht mehr zu Wissen“

e) „nimmt Geräusche und Stimmen wahr, obwohl niemand sonst im Haus ist.“

f) „Der Gang ist ungestört, sie gebraucht ihre Hände gleich gut. Die Kniesehnenreflexe sind vorhanden.“

Station 5 – Veränderungen des Gehirns

A9.

- a) Identifiziere das gesunde und erkrankte Gehirn anhand äußerlicher Veränderungen.
- b) Vergleiche beide Gehirnmodelle und beschreibe die äußeren Veränderungen des kranken Gehirns.



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 9 „äußerer Vergleich Gehirne“ auf dem Tablet!

A10. Betrachte dir nun mithilfe der App (→ Aufgabe 10) das MRT-Bild der erkrankten und gesunden Gehirnscheibe und vergleiche beide auf Veränderungen im Gehirn.

Gehe dabei auf die angegebenen Regionen ein!

Temporallappen:

Frontallappen:

Cortex (graue Substanz):

Mark (weiße Substanz):

Ventrikel:

Hippocampus:



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 10 „Vergleich MRT-Bilder“ auf dem Tablet!




Station 6 – Die Phasen der Alzheimerdemenz

Untersuchungen anderer Ärzte haben gezeigt, dass die Krankheit schrittweise in verschiedenen Phasen voranschreitet. Je weiter die Krankheit voranschreitet, desto mehr verändert sich auch das Gehirn.

A11. Betrachte dir nun die Abbildung in M7.

Beschreibe die strukturellen Veränderungen zwischen den einzelnen Phasen und gebe sie in der Spalte „Pathologie des Gehirns“ in Tabelle 2 an!

Tabelle 2: Die Phasen der Alzheimerdemenz und auftretende Veränderungen

Krankheitsstadium	Pathologie des Gehirns	Symptome
gesund  frühe Demenzphase (Phase 1)		
frühe Demenzphase (Phase 1)  mittlere Demenzphase (Phase 2)		
mittlere Demenzphase (Phase 2)  späte Demenzphase (Phase 3)		

HIER STOPPI!



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 11 „Phasen der Alzheimerkrankheit“ auf dem Tablet!

Station 6 – Die Phasen der Alzheimerdemenz

A12.

- a) Fasse die Symptome der einzelnen Alzheimerdemenz-Phasen mithilfe von M8 in Tab. 2 (S. 9) zusammen!**

M8 | Diagnose Alzheimer – Die Krankheitsphasen

Phase 1 - Frühe Demenzphase

Das auffälligste Merkmal ist eine weiter zunehmende Lernschwäche. Verabredungen werden vergessen, ebenso Gesprächsinhalte oder Namen von Bekannten. Erinnerungen des Lebens bleiben vorhanden, aber die zeitliche Einordnung wird ungenau. Der Beruf kann nur selten noch ausgeübt werden und das Führen des Haushalts wird immer schwieriger. Die Betroffenen sind sich ihrer Schwächen bewusst.

Phase 2 - Mittlere Demenzphase

Aktuelle Eindrücke bleiben nur noch Augenblicke im Gedächtnis. Erinnerungen des mittleren Erwachsenenalters bis zur Jugend können noch gut abgerufen werden, aber Erinnerungen die nicht so lange zurückliegen gehen verloren. Beim Sprechen werden oft Worte gesucht oder Umschreibungen verwendet. Lesen können die betroffenen oft noch gut, aber der Inhalt des Gelesenen wird nicht richtig aufgefasst. Es tauchen Probleme beim Benutzen von Besteck auf. Alltägliche Aktivitäten erfordern Hilfestellung. Das Erkennen von Gesichtern und Gegenständen ist auch in Mitleidenschaft gezogen. Die Orientierung und das Bewusstsein für die Krankheit geht langsam verloren. Die Betroffenen müssen intensiv betreut werden.

Phase 3 - Späte Demenzphase

Die Sprache besteht nur noch aus wenigen Wörtern oder einfachen Sätzen. Einfachste Dinge, wie das Einnehmen von Mahlzeiten oder das Aufsuchen der Toilette, können nicht mehr alleine bewältigt werden. Die Betroffenen sind sich ihrer Krankheit nur noch zu wenigen Zeitpunkten bewusst. Zum Ende geht die Kontrolle der Körperhaltung und so auch die Mobilität verloren. Dann werden die Betroffenen bettlägerig und anfällig für Wundliegen und Infektionen. Die häufigste Todesursache ist eine Lungenentzündung.

- b) In welcher Phase befinden sich die zwei Patientinnen aus dem Interview? Begründe!**

1.1.7 Lernheft B Sekundarstufe II

Gruppe B



Name: _____

Datum: _____

Kurs: _____

Das Interview

Stelle dir vor, du wärst der behandelnde Arzt der im Video gezeigten Patientinnen. Für eine Diagnose zu stellen, sollst du die Symptomatik der Patientinnen kurz zusammenfassen.



Abb. 1: Interview zwischen Patientin und Arzt

A1. Beschreibe die Symptome der Patientinnen, welche dir beim Betrachten des Videos aufgefallen sind.

Station 1 - Äußere Neuroanatomie

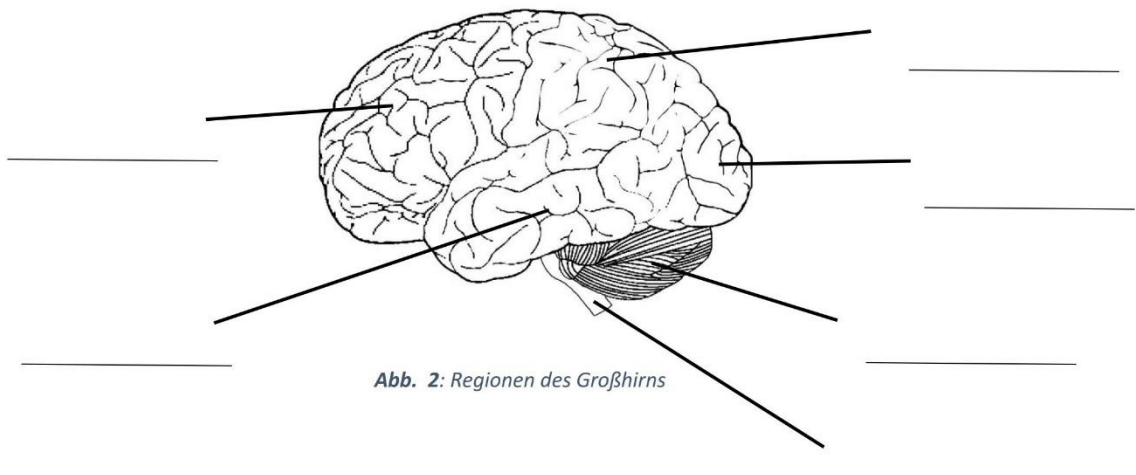
Information:

Die Natur hat im Laufe der Evolution viele faszinierende Entwicklungen hervorgebracht, allem voran das menschliche Gehirn, ohne welches wir die vielen verschiedenen Sinneseindrücke gar nicht wahrnehmen könnten. Das Gehirn wird auch als Schalt- bzw. Steuerzentrale des Menschen bezeichnet. Sämtliche Tätigkeiten, wie etwa das Sehen, Sprechen, Laufen, Essen, Schlafen, Lernen und noch vieles mehr werden von ihm gesteuert. Durch Nervenimpulse, welche über Nervenbahnen geleitet werden, empfängt es Informationen der peripheren Sinnesorgane und leitet Befehle an unsere Muskulatur.

A2. Wirft man einen genaueren Blick auf das Gehirn, so lassen sich anhand der äußeren Anatomie verschiedene Regionen identifizieren.

- a) **Vergleiche die Abbildung aus M1 mit dem Gehirnmodell, indem du die farblich markierten Regionen am Modell identifizierst. Fahre mit einem Finger die Grenzen am Modell nach.**
- b) **Durch welche Strukturen erfolgt die Aufteilung in die einzelnen Regionen?**

- c) **Zeichne die Grenzen der Gehirnregionen in Abbildung 2 ein und benenne mithilfe von M2 die Gehirnregionen.**



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 2 „äußerer Aufbau Gehirn“ auf dem Tablet!

Station 2 – Innere Neuroanatomie [I]

Zur anatomischen Beschreibung des menschlichen Körpers werden in der Wissenschaft verschiedene Schnittebenen verwendet (Abb 3). Schneidest du also ein Gehirn entlang der **Sagittalebene**, erhältst du eine rechte- und eine linke Gehirnhälfte. Um aber etwas von dem inneren Aufbau des Gehirns abbilden zu können, musst du etwas abseits der Sagittalebene das Gehirn schneiden. So ein Schnitt wird auch als **Parasagittalschnitt** (bed.: neben der Sagittalebene gelegen) bezeichnet.

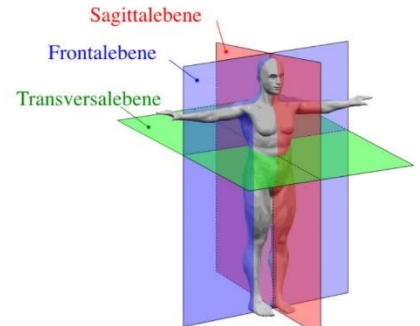


Abb.3: Anatomische Schnittebenen

A3. Benenne mit Hilfe von M3 die aufgezeigten Strukturen in Abbildung 4.

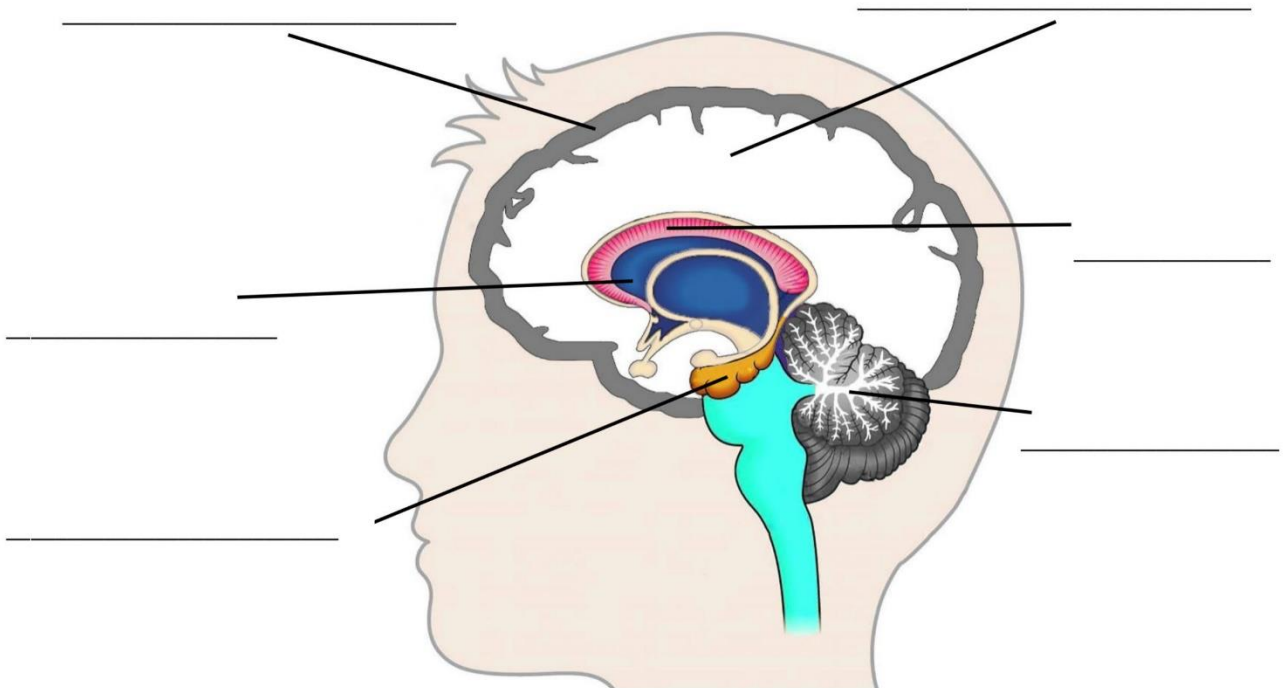


Abb. 4: Der innere Aufbau des Gehirns



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 3 „innerer Aufbau Gehirn“ auf dem Tablet!

Station 2 – Innere Neuroanatomie [II]

Nicht nur **Sagittal- und Parasagittalschnitte** werden zur Betrachtung des Aufbaus herangezogen, sondern auch **Frontalschnitte**.

- A4.** Nutze die App (→ **Aufgabe 4**) und die gesunde Gehirnscheibe, um die richtige Position der Schnittebene (Frontalschnitt) herauszufinden.
- a) Zeichne die Schnittebene des **Frontalschnitts** mit je einem Strich in die Abbildung 5 und 6 ein!
 - b) Zeichne außerdem die Schnittebenen des **Parasagittalschnitts** (S. 3) in Abbildung 6 ein!

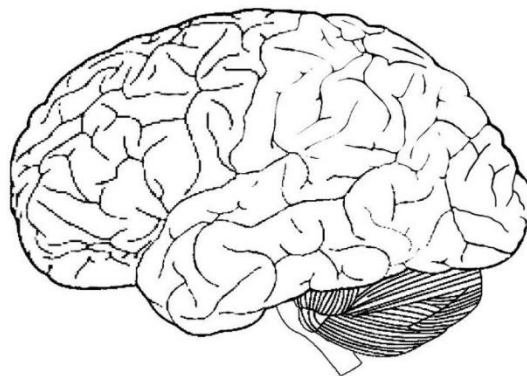


Abb. 5: Seitenansicht Gehirn; Schnittebene: Frontalschnitt

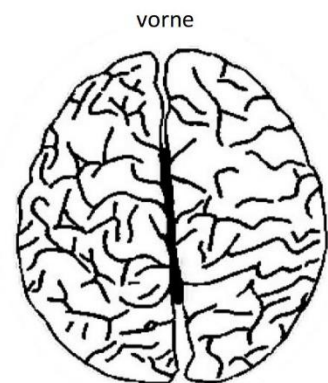


Abb.6: Draufsicht Gehirn; Schnittebene Frontal- und Parasagittalschnitt

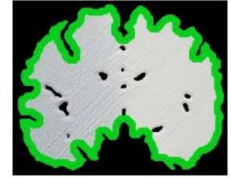


Beantworte die Umfrage: Aufgabe 4 „Schnittebenen“ auf dem Tablet!

Station 2 – Innere Neuroanatomie [II]

A5. Nutze die App (→ Aufgabe 5) indem du die Kamera auf die folgende Abbildung richtest (Abb. 7).

Zeichne außen entlang der **Hirnrinde** möglichst genau den Bereich des Stirnlobens und des Schläfenlobens in verschiedenen Farben nach!



markiert: Hirnrinde

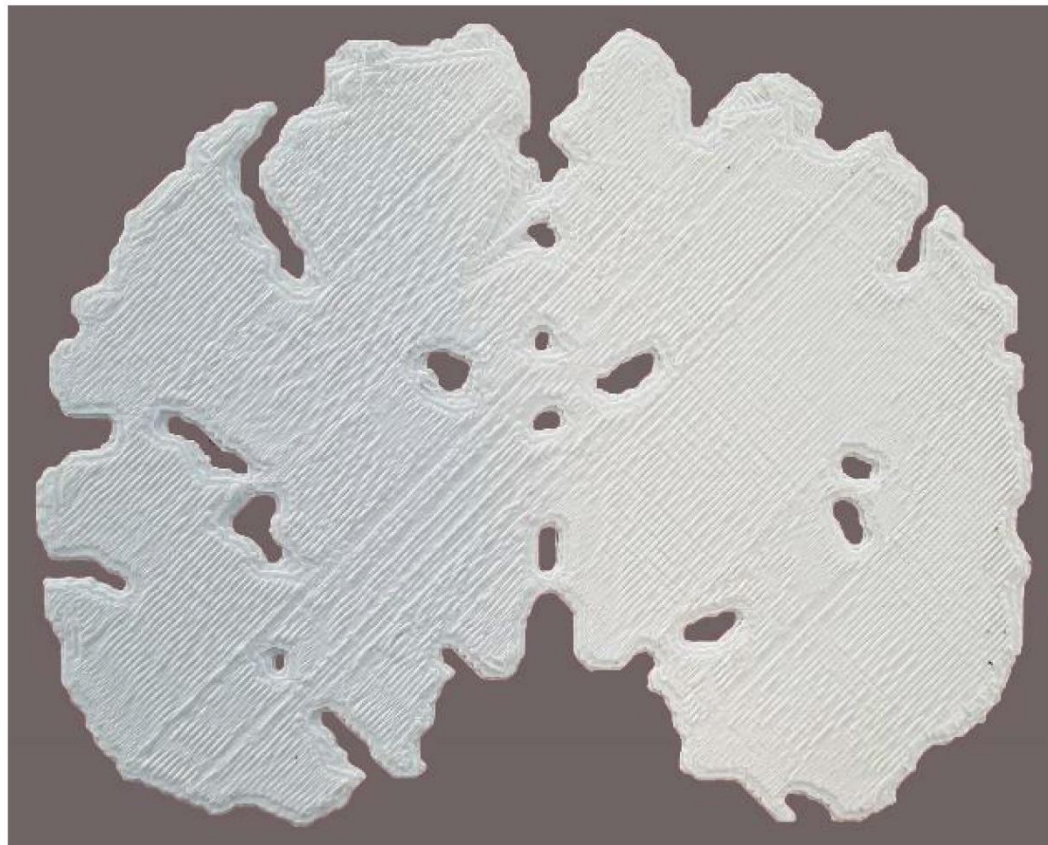


Abb. 7: Frontalschnitt gesundes Gehirn

A6. Stelle Vermutungen mithilfe von Aufgabe A3 (S. 3) auf, wo sich

- a) die Hippocampi und
- b) die Ventrikel befinden.

Überprüfe deine Vermutung durch Einblenden der Areale in der App (→ Aufgabe 6).
Zeichne diese ebenfalls in Abbildung 7 ein!



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 5/6 „innerer Aufbau Gehirn“ auf dem Tablet!

Station 3 – Funktionale Neuroanatomie

A7. Lies den Text M4 und ordne den einzelnen Gehirnregionen in Tabelle 1 die entsprechende Funktion zu!

Gehirnregion	Aufgabe/Funktion	Krankheitsanzeichen	Beeinträchtigung vorhanden?	
			ja	nein
Okzipitallappen				
Temporallappen				
Frontallappen				
Parietallappen		HIER STOPPI		
Cortex	Deklaratives Wissen (Worte, Daten, Bilder, Fakten ...)			
Cerebellum				
Stammhirn				
Hippocampus				

Tabelle 1: Gehirnregionen und ihre Funktionen

grauer Bereich ist für die Folgestunde!



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 7 „Funktionen des Gehirns“ auf dem Tablet!

Station 4 – Die Krankenakte

Jetzt wo wir wissen, dass bestimmte Gehirnregionen unterschiedliche Funktionen erfüllen, können wir über entsprechende Funktionsstörungen den wahrscheinlichen **pathogenen Veränderungen** der Alzheimerdemenz auf den Grund gehen.

Aus dem Interview zwischen dem Arzt mit den Alzheimerpatientinnen ist dir bereits deren Symptomatik bekannt (vgl. Aufgabe 1). Zusätzlich hat der Arzt eine Krankenakte angelegt und weitere Symptome festgehalten (M5).

A8.

- a) Ordne die Symptome aus Aufgabe 1 (S. 1) und der Krankenakte (M5) den wohl betroffenen Gehirnregionen in Tabelle 1 (S. 6) zu!
- b) Kreuze in der Spalte „*Beeinträchtigung vorhanden?*“ das richtige Kästchen an!

M5 | Notizen aus der Krankenakte

a) „keine Störung des Sehfeldes bekannt“

b) „kann einen Kugelschreiber nicht benennen“

c) „kann eine dreiteilige Wortfolge (Auto-Ball-Zitrone) wiedergeben, aber nicht merken“

d) „Den Gebrauch einzelner Gegenstände scheint sie nicht mehr zu Wissen“

e) „nimmt Geräusche und Stimmen wahr, obwohl niemand sonst im Haus ist.“

f) „Der Gang ist ungestört, sie gebraucht ihre Hände gleich gut. Die Kniesehnenreflexe sind vorhanden.“

Station 5 – Veränderungen des Gehirns

A9.

- a) Identifiziere das gesunde und erkrankte Gehirn anhand äußerlicher Veränderungen.
- b) Vergleiche beide Gehirnmodelle mithilfe der App (→ Aufgabe 9) und beschreibe die äußeren Veränderungen des kranken Gehirns.



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 9 „äußerer Vergleich Gehirne“ auf

A10. Betrachte dir nun in M6 das MRT-Bild der erkrankten und gesunden Person (Frontalschnitt) und vergleiche beide auf Veränderungen im Gehirn.

Gehe dabei auf die angegebenen Regionen ein!

Temporallappen:

Frontallappen:

Cortex (graue Substanz):

Mark (weiße Substanz):

Ventrikel:

Hippocampus:



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 10 „Vergleich MRT-Bilder“ auf dem Tablet!

Station 6 – Die Phasen der Alzheimerdemenz

Untersuchungen anderer Ärzte haben gezeigt, dass die Krankheit schrittweise in verschiedenen Phasen voranschreitet. Je weiter die Krankheit voranschreitet, desto mehr verändert sich auch das Gehirn.

A11. Betrachte dir nun mithilfe der App (→ **Aufgabe 11** die Rückseite (glattere Seite) der **gesunden Gehirnscheibe**.

Beschreibe die strukturellen Veränderungen zwischen den einzelnen Phasen und gebe sie in der Spalte „*Pathologie des Gehirns*“ in Tabelle 2 an!

Tabelle 2: Die Phasen der Alzheimerdemenz und auftretende Veränderungen

Krankheitsstadium	Pathologie des Gehirns	HIER STOPPI!	Symptome
gesund  frühe Demenzphase (Phase 1)			
frühe Demenzphase (Phase 1)  mittlere Demenzphase (Phase 2)			
mittlere Demenzphase (Phase 2)  späte Demenzphase (Phase 3)			



Beantworte die Umfrage: Aufgabe 11 „Phasen der Alzheimerkrankheit“ auf dem Tablet!

Station 6 – Die Phasen der Alzheimerdemenz

A12.

- a) **Fasse die Symptome der einzelnen Alzheimerdemenz-Phasen mithilfe von M7 in Tab. 2 zusammen!**

M7| Diagnose Alzheimer – Die Krankheitsphasen

Phase 1 - Frühe Demenzphase

Das auffälligste Merkmal ist eine weiter zunehmende Lernschwäche. Verabredungen werden vergessen, ebenso Gesprächsinhalte oder Namen von Bekannten. Erinnerungen des Lebens bleiben vorhanden, aber die zeitliche Einordnung wird ungenau. Der Beruf kann nur selten noch ausgeübt werden und das Führen des Haushalts wird immer schwieriger. Die Betroffenen sind sich ihrer Schwächen bewusst.

Phase 2 - Mittlere Demenzphase

Aktuelle Eindrücke bleiben nur noch Augenblicke im Gedächtnis. Erinnerungen des mittleren Erwachsenenalters bis zur Jugend können noch gut abgerufen werden, aber Erinnerungen die nicht so lange zurückliegen gehen verloren. Beim Sprechen werden oft Worte gesucht oder Umschreibungen verwendet. Lesen können die betroffenen oft noch gut, aber der Inhalt des Gelesenen wird nicht richtig aufgefasst. Es tauchen Probleme beim Benutzen von Besteck auf. Alltägliche Aktivitäten erfordern Hilfestellung. Das Erkennen von Gesichtern und Gegenständen ist auch in Mitleidenschaft gezogen. Die Orientierung und das Bewusstsein für die Krankheit geht langsam verloren. Die Betroffenen müssen intensiv betreut werden.

Phase 3 - Späte Demenzphase

Die Sprache besteht nur noch aus wenigen Wörtern oder einfachen Sätzen. Einfachste Dinge, wie das Einnehmen von Mahlzeiten oder das Aufsuchen der Toilette, können nicht mehr alleine bewältigt werden. Die Betroffenen sind sich ihrer Krankheit nur noch zu wenigen Zeitpunkten bewusst. Zum Ende geht die Kontrolle der Körperhaltung und so auch die Mobilität verloren. Dann werden die Betroffenen bettlägerig und anfällig für Wundliegen und Infektionen. Die häufigste Todesursache ist eine Lungenentzündung.

- b) **In welcher Phase befinden sich die zwei Patientinnen aus dem Interview? Begründe!**

1.1.8 Material A Sekundarstufe II

M1 | Der innere Aufbau des Gehirns

Das Gehirn besteht aus zwei Hälften (Hemisphären), die durch den sogenannten Balken (Corpus callosum) miteinander verbunden sind. 80 Prozent der Hirnmasse entfallen auf das Großhirn.

Das Großhirn (Telencephalon) besitzt eine äußere Schicht, die als *Cortex* bezeichnet wird. Der Cortex besteht vornehmlich aus *grauer Substanz*. Diese wird der innenliegenden *weißen Substanz* gegenübergestellt. Beide lassen sich aufgrund ihrer charakteristischen Färbung sehr gut im MRT-Bild betrachten. Die graue Substanz besteht vornehmlich aus Nervenzellkörpern, die bspw. Kerngebiete darstellen. Die weiße Substanz besteht vornehmlich aus Nervenfasern, deren typische sichtbare Färbung durch umhüllende Myelinscheiden entsteht. Die markante Verästelung der weißen Substanz im Kleinhirn wird sinnbildlich als Lebensbaum oder *Arbor Vitae* bezeichnet. Im Inneren des Gehirns – umgeben von weißer Substanz – liegen mit Hirnwasser gefüllte Hohlräume: die sogenannten *Ventrikel*. Ebenfalls im inneren des Gehirns liegt das limbische System. Der dazugehörige *Hippocampus* gilt als wesentliche Schaltzentrale des Gehirns. Hier fließen Informationen verschiedener sensorischer Systeme zusammen, die verarbeitet und von dort zum Cortex zurückgesandt werden.

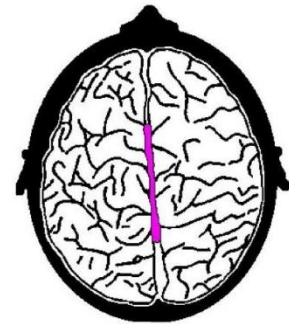
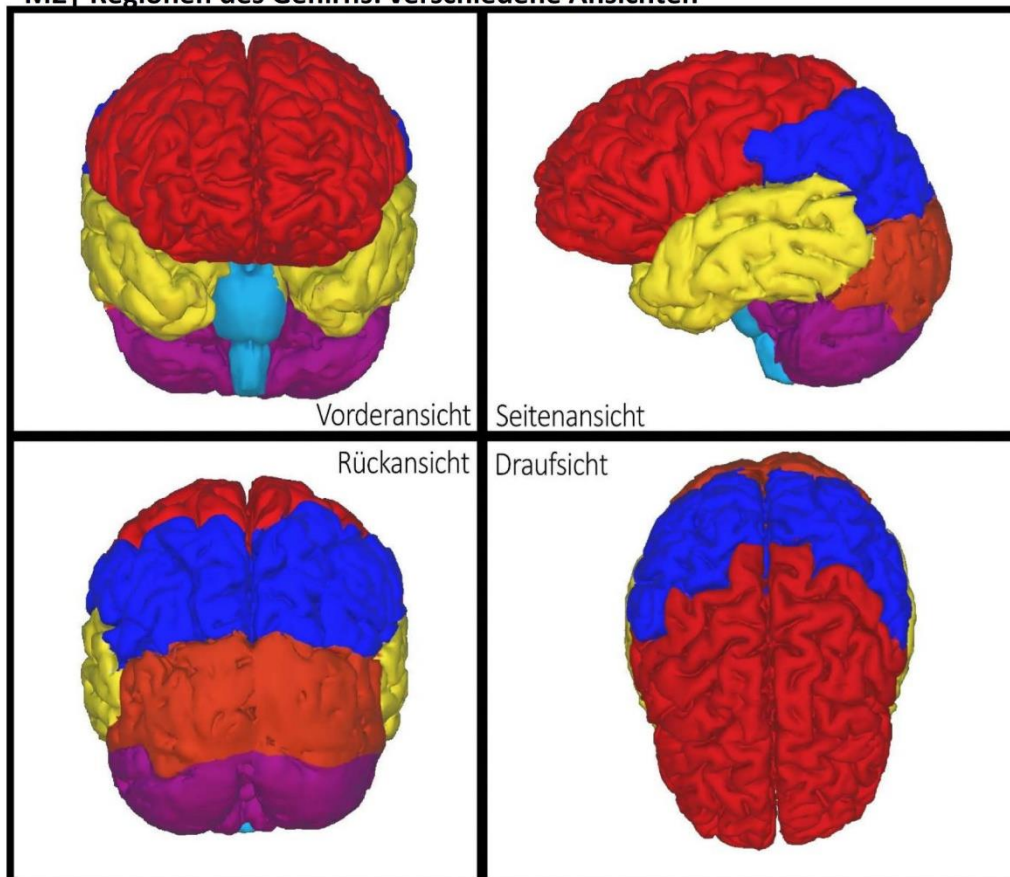
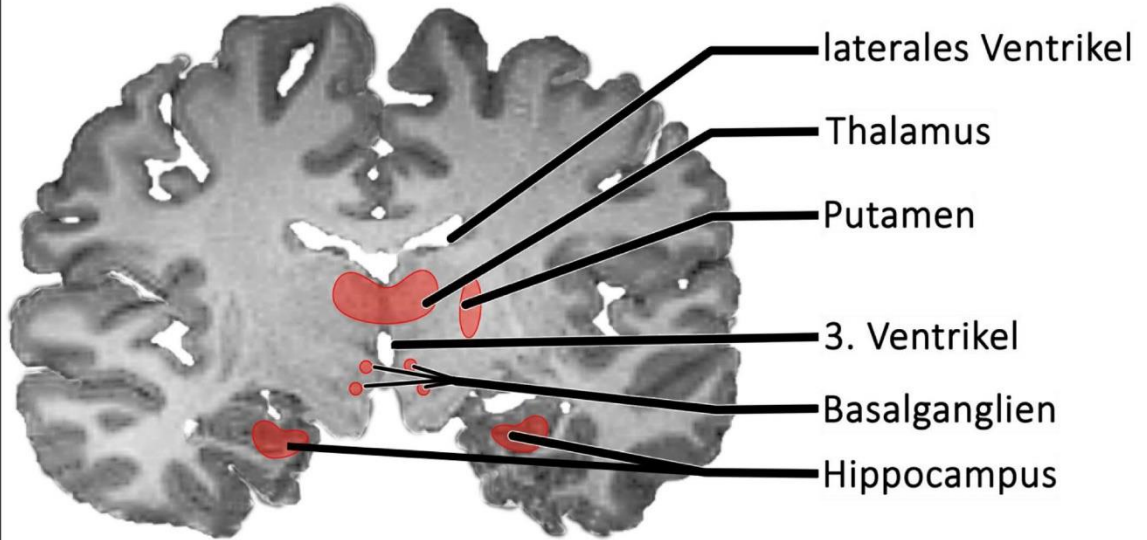


Abb. A: Draufsicht Gehirn; rosa eingefärbt: Corpus callosum

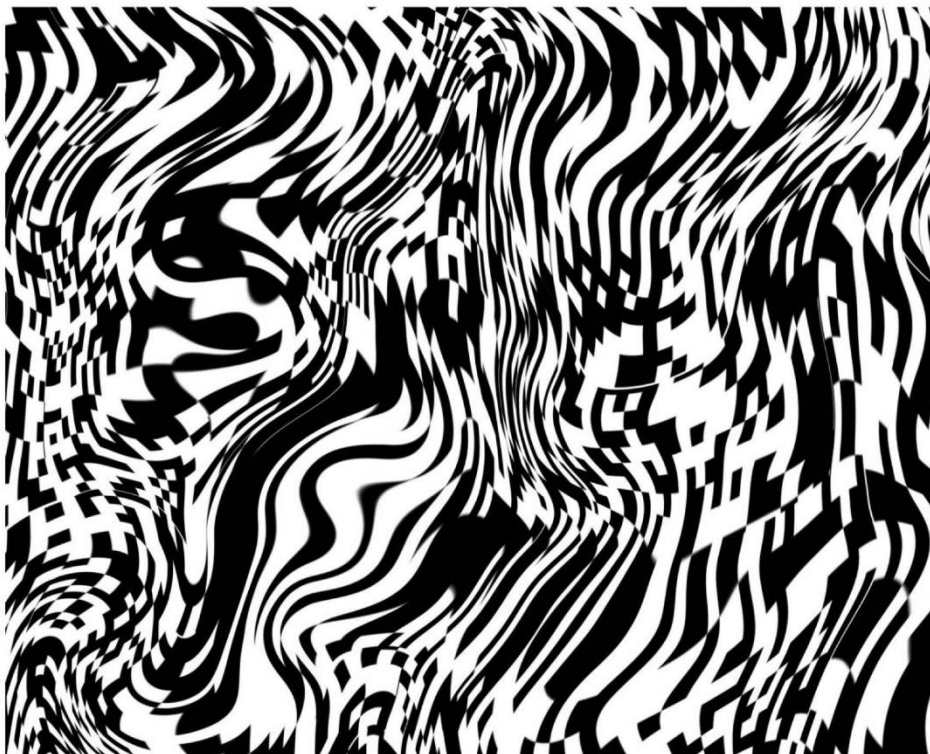
M2 | Regionen des Gehirns: verschiedene Ansichten



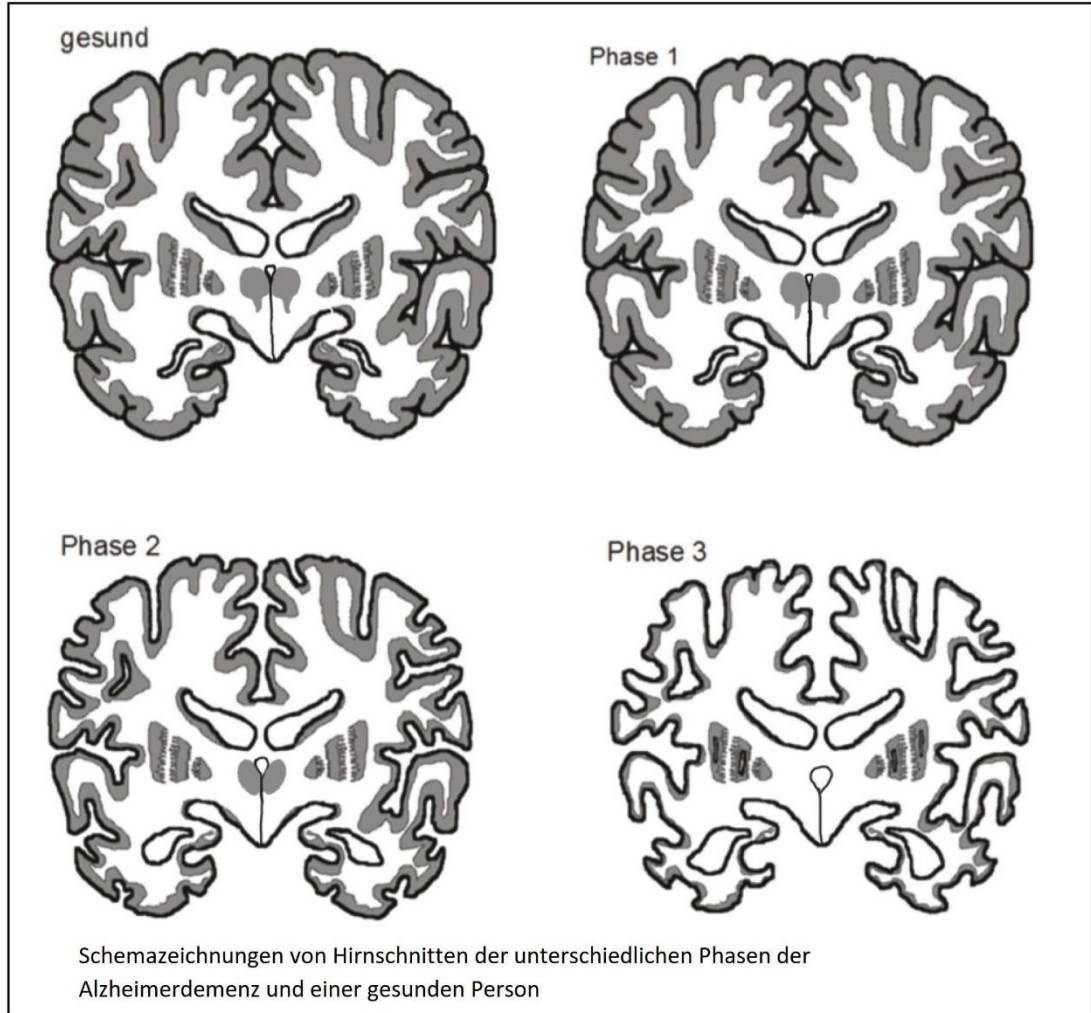
M4 | MRT-Bild; Medialer Frontalschnitt: Ventrikel und Hippocampus



M5 | „Triggerbild“: Funktionen & Aufgaben des Gehirns

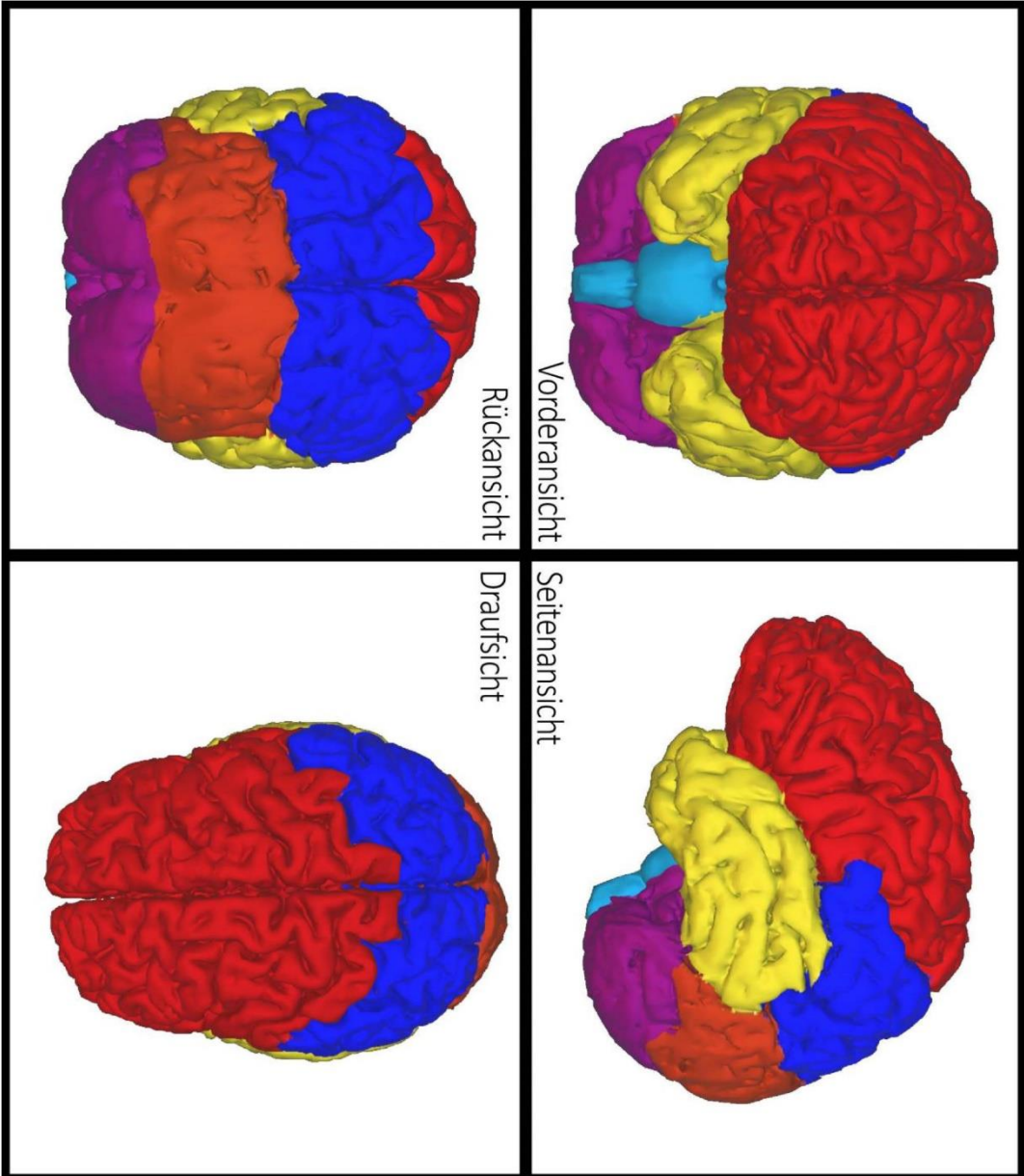


M7 | Die Phasen der Alzheimerdemenz und auftretende Veränderungen



1.1.9 Material B Sekundarstufe II

M1 | Regionen des Gehirns: verschiedene Ansichten



M2| Die Regionen des Gehirns

Das Großhirn wird sehr stark von seinen optisch auffälligen Windungen, Spalten und Furchen geprägt. Das Gehirn lässt sich in verschiedene Regionen aufteilen: Der Frontallappen ist die Größte der vier Großhirnregionen und liegt, wie der Name bereits vermuten lässt, im vorderen Bereich des Großhirns. Unmittelbar dahinter, im oberen und mittleren Bereich, schließt sich der Parietallappen an. Unterhalb des Frontal- und Parietallappens befinden sich seitlich die Temporallappen. Die vierte und letzte Region des Großhirns, der Okzipitallappen befindet sich am Hinterkopf, oberhalb des Cerebellums. Das Stammhirn ist mit dem Großhirn und dem Cerebellum verbunden.

M3| Der innere Aufbau des Gehirns

Das Gehirn besteht aus zwei Hälften (Hemisphären), die durch den sogenannten Balken (Corpus callosum) miteinander verbunden sind. 80 Prozent der Hirnmasse entfallen auf das Großhirn.

Das Großhirn (Telencephalon) besitzt eine äußere Schicht, die als *Cortex* bezeichnet wird. Der Cortex besteht vornehmlich aus *grauer Substanz*. Diese wird der innenliegenden *weißen Substanz* gegenübergestellt. Beide lassen sich aufgrund ihrer charakteristischen Färbung sehr gut im MRT-Bild betrachten. Die graue Substanz besteht vornehmlich aus Nervenzellkörpern, die bspw. Kerngebiete darstellen. Die weiße Substanz besteht vornehmlich aus Nervenfasern, deren typische sichtbare Färbung durch umhüllende Myelinscheiden entsteht. Die markante Verästelung der weißen Substanz im Kleinhirn wird sinnbildlich als Lebensbaum oder *Arbor Vitae* bezeichnet. Im Inneren des Gehirns – umgeben von weißer Substanz – liegen mit Hirnwasser gefüllte Hohlräume: die sogenannten *Ventrikel*. Ebenfalls im inneren des Gehirns liegt das limbische System. Der dazugehörige *Hippocampus* gilt als wesentliche Schaltzentrale des Gehirns. Hier fließen Informationen verschiedener sensorischer Systeme zusammen, die verarbeitet und von dort zum Cortex zurückgesandt werden.

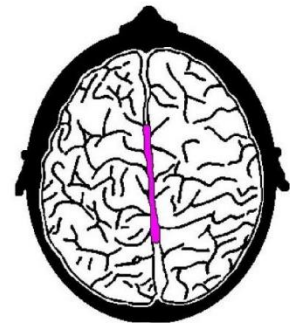


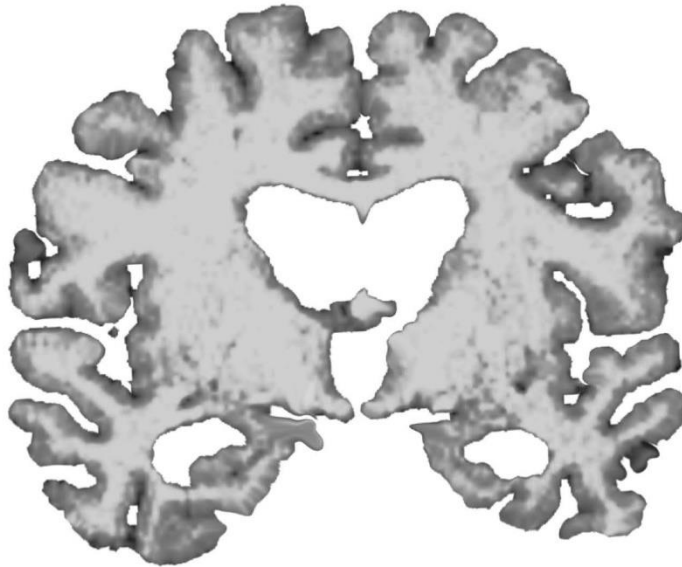
Abb. A: Draufsicht Gehirn; rosa eingefärbt: Corpus callosum

M4| Aufgaben des Gehirns

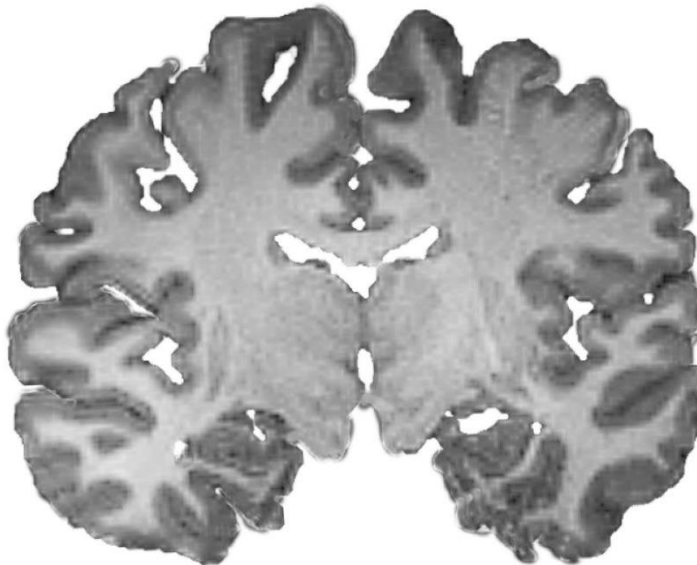
Jedem Bereich des Gehirns können spezifische Aufgaben zugeteilt werden, für die er zuständig ist. In der Rinde des *Okzipitallappens* liegt bspw. das Sehzentrum, in der Rinde der Temporallappen das Hörzentrum. In diesen Bereichen münden die Nerven, die von Augen und Ohren kommen. Erlernete Bewegungen und Bewegungsabfolgen wie Tanzen oder Jonglieren werden als prozedurales Wissen (Prozess = Ablauf) bezeichnet. Dieses wird im *hinteren Teil des Frontallappens* gespeichert. Während der *vordere Teil des Parietallappens* Sinneswahrnehmungen wie Tastsinn (Druck, Vibration) verarbeitet, findet dort im oberen Teil räumliches Denken statt wie z.B. die Wahrnehmung der Lage der Körperteile im Raum. Erinnerungen an Bilder, Fakten, Worte und vieles mehr werden über die gesamte Hirnrinde verstreut gespeichert. Dieses Wissen wird als deklaratives (=beschreibbares) Wissen bezeichnet, da man es mit Worten erklären

und beschreiben kann. Gut untersucht und allgemein anerkannt ist die Rolle des Cerebellums für Planung, Koordination und Feinabstimmung von Bewegungen. Das Stammhirn ist für die essenziellen Lebensfunktionen zuständig wie die Steuerung der Herzfrequenz, des Blutdrucks und der Atmung. Zudem ist er für wichtige Reflexe wie den Lidschluss-, Schluck- und Husten-Reflex verantwortlich. Auch der Schlaf und die verschiedenen Schlaf- und Traumphasen werden hier kontrolliert. Der Hippocampus, als Teil des limbischen Systems, gilt als wesentliche Schaltzentrale des Gehirns. Hier fließen Informationen verschiedener sensorischer Systeme zusammen, die verarbeitet und von dort zur Hirnrinde zurückgesandt werden. Damit ist der Hippocampus enorm wichtig für die Gedächtniskonsolidierung, also die Überführung von Gedächtnisinhalten aus dem Kurzzeit- in das Langzeitgedächtnis.

M6 | MRT Bild einer kranken- und gesunden Person (Frontalschnitt)





MRT-Bild einer kranken Person



MRT-Bild einer gesunden Person



1.2 Studie Mitochondrien und Chloroplasten

1.2.1 Einführungsfolien/Sicherung

vorne	hinten
 A Name:	Deine Kennung: LIWI
 B Name:	Deine Kennung: RUMA

!!!GANZ WICHTIG!!!

Gruppe bitte bei **ALLEN** Umfragen und TESTS eingeben

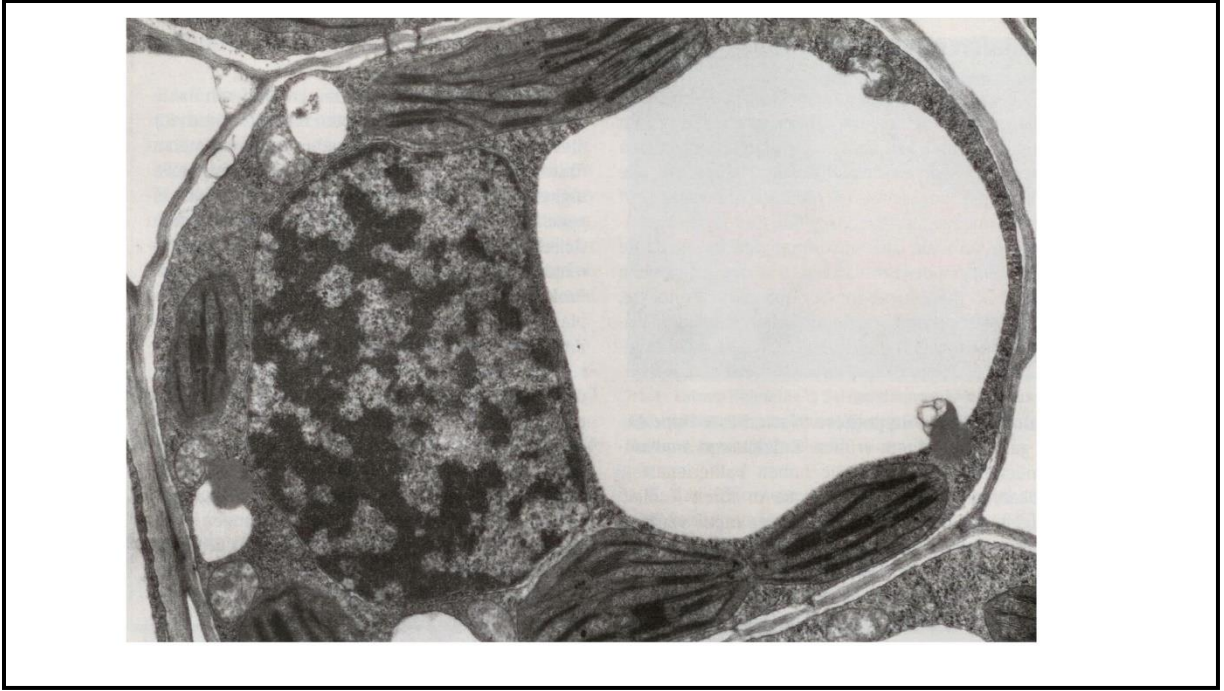
vorne	hinten
 A Name:	Deine Kennung: LIWI
 B Name:	Deine Kennung: RUMA

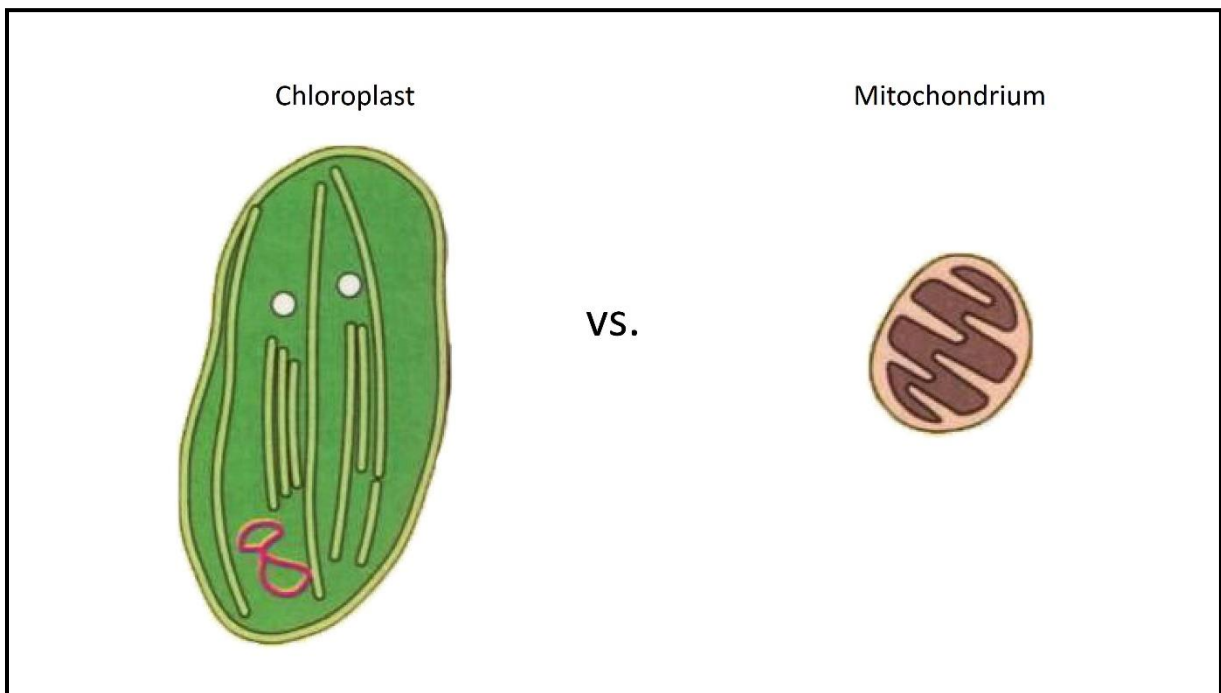
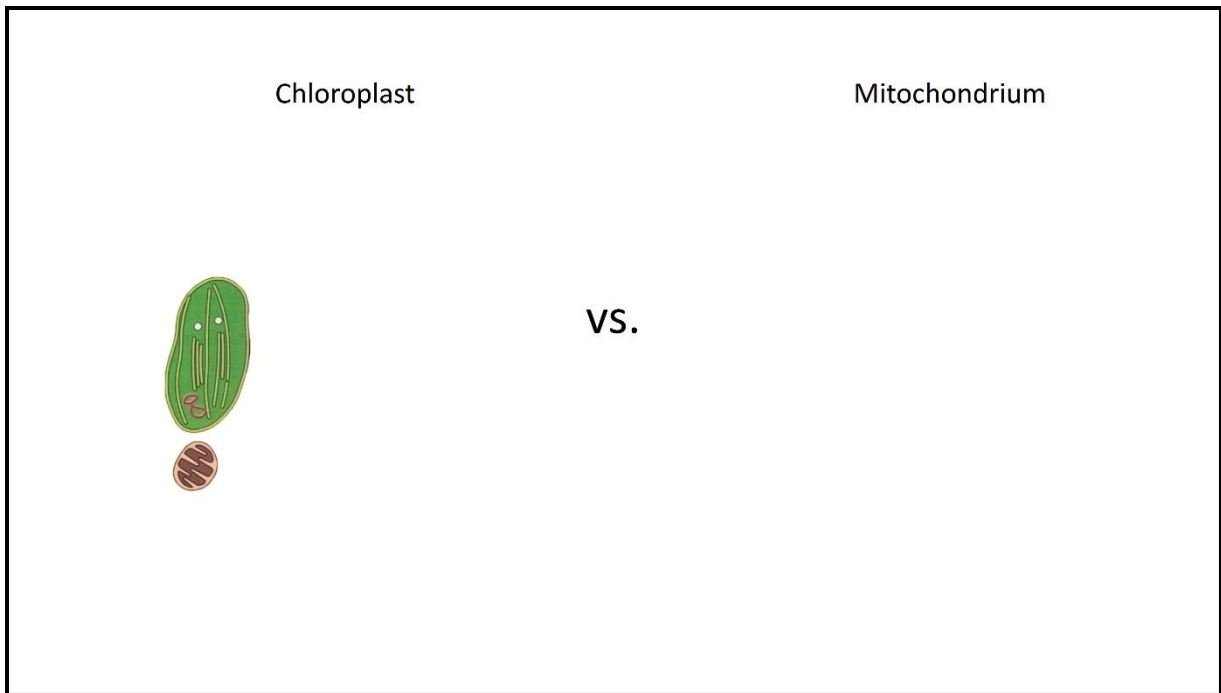
!!!GANZ WICHTIG!!!


Gruppe bitte bei **ALLEN** Umfragen und TESTS eingeben

Kennung bitte bei **ALLEN** Umfragen und TESTS eingeben

Bitte NIE deinen Namen eingeben!







Aufbau von Chloroplasten und Mitochondrien

1. Vervollständige mithilfe der App die in vorliegenden Lückentext, indem du die einzelnen Bestandteile des Chloroplasten benennst.


Bei Chloroplasten (griech. chloros = grün) handelt es sich um jene Organellen, die den Pflanzen und Algen ihre typisch grüne Farbe verleihen. Einzelne Chloroplasten sind etwa 5-6 µm (Mikrometer) lang. Chloroplasten sind von zwei Zellmembranen umschlossen, der _____ und der _____ über welche die Abgabe und die Aufnahme von Substanzen (z.B. Wasser) ermöglicht werden. Dazwischen befindet sich der schmale _____. Im Inneren sind Chloroplasten mit einer plasmatischen Grundsubstanz ausgefüllt (_____), die Enzyme, ringförmige _____ und _____ enthält. Darüber hinaus ist das Stroma von _____ durchzogen. An etlichen Stellen sind flache, runde Ausstülpungen dieser Membran „geldrollenartig“ übereinander gelagert. Einen solchen Thylakoidstapel nennt man _____. Neben den Proteinen der Photosynthese befinden sich auch _____ zur Energiegewinnung in der Membran.

Beantworte die Umfrage „Aufgabe 1: Chloroplast“ auf dem Tablet!

2. Vervollständige mithilfe der App die in vorliegenden Lückentext, indem du die einzelnen Bestandteile des Mitochondriums benennst.

Mitochondrien sind von zwei Zellmembranen umgeben, der _____ und der _____. Während der Raum zwischen den zwei Membranen als _____ bezeichnet wird, liegt im Inneren des Mitochondriums die sogenannte _____. Die innere Mitochondrienmembran ist stark gefaltet. Diese Einstülpungen werden auch als _____ bezeichnet und dienen der Oberflächenvergrößerung. Hier befinden sich auch die Proteine der Atmungskette, die _____. Im Matrixraum liegt die Erbinformation, wodurch Mitochondrien als autonomes Organell fungieren und sich unabhängig vom Zellzyklus der Zelle teilen. Mitochondrien haben ihre eigene DNA, die _____. Sie ist ringförmig und stammt evolutionär gesehen wahrscheinlich von der Einwanderung eines Bakteriums in einen Vorgänger der eukaryotischen Zelle ab. Für diese Theorie spricht auch die Tatsache, dass sich in der Matrix _____ befinden, diese sind typisch für prokaryotische Zellen. In eukaryotischen Zellen finden sich hingegen stets 80S-Ribosomen.

Beantworte die Umfrage „Aufgabe 2: Mitochondrium“ auf dem Tablet!



Aufbau von Chloroplasten und Mitochondrien

1. Vervollständige mithilfe der App die in vorliegenden Lückentext, indem du die einzelnen Bestandteile des Chloroplasten benennst.

Bei Chloroplasten (griech. chloros = grün) handelt es sich um jene Organellen, die den Pflanzen und Algen ihre typisch grüne Farbe verleihen. Einzelne Chloroplasten sind etwa 5-6 µm (Mikrometer) lang. Chloroplasten sind von zwei Zellmembranen umschlossen, der _____ und der _____ über welche die Abgabe und die Aufnahme von Substanzen (z.B. Wasser) ermöglicht werden. Dazwischen befindet sich der schmale _____. Im Inneren sind Chloroplasten mit einer plasmatischen Grundsubstanz ausgefüllt (_____), die Enzyme, ringförmige _____ und _____ enthält. Darüber hinaus ist das Stroma von _____ durchzogen. An etlichen Stellen sind flache, runde Ausstülpungen dieser Membran „geldrollenartig“ übereinander gelagert. Einen solchen Thylakoidstapel nennt man _____. Neben den Proteinen der Photosynthese befinden sich auch _____ zur Energiegewinnung in der Membran.

Beantworte die Umfrage „Aufgabe 1: Chloroplast“ auf dem Tablet!

2. Vervollständige mithilfe der App die in vorliegenden Lückentext, indem du die einzelnen Bestandteile des Mitochondriums benennst.

Mitochondrien sind von zwei Zellmembranen umgeben, der _____ und der _____. Während der Raum zwischen den zwei Membranen als _____ bezeichnet wird, liegt im Inneren des Mitochondriums die sogenannte _____. Die innere Mitochondrienmembran ist stark gefaltet. Diese Einstülpungen werden auch als _____ bezeichnet und dienen der Oberflächenvergrößerung. Hier befinden sich auch die Proteine der Atmungskette, die _____. Im Matrixraum liegt die Erbinformation, wodurch Mitochondrien als autonomes Organell fungieren und sich unabhängig vom Zellzyklus der Zelle teilen. Mitochondrien haben ihre eigene DNA, die _____. Sie ist ringförmig und stammt evolutionär gesehen wahrscheinlich von der Einwanderung eines Bakteriums in einen Vorgänger der eukaryotischen Zelle ab. Für diese Theorie spricht auch die Tatsache, dass sich in der Matrix _____ befinden, diese sind typisch für prokaryotische Zellen. In eukaryotischen Zellen finden sich hingegen stets 80S-Ribosomen.

Beantworte die Umfrage „Aufgabe 2: Mitochondrium“ auf dem Tablet!



TECHNISCHE UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN Aufbau von Chloroplasten und Mitochondrien **didaktik Biologie**

1. Vervollständige mithilfe der App den vorliegenden Lückentext, indem du die einzelnen Bestandteile des Chloroplasten benennst.

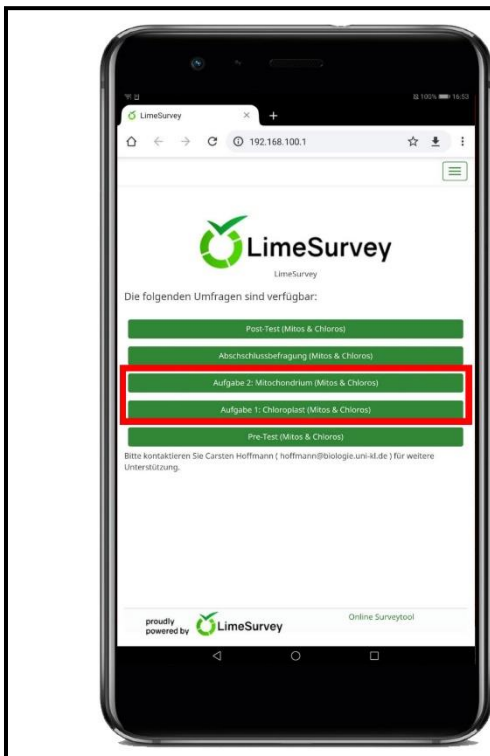
Bei Chloroplasten (griech. chloros = grün) handelt es sich um jene Organellen, die den Pflanzen und Algen ihre typisch grüne Farbe verleihen. Einzelne Chloroplasten sind etwa 5-6 µm (Mikrometer) lang. Chloroplasten sind von zwei Zellmembranen umschlossen, der _____ und der _____ über welche die Abgabe und die Aufnahme von Substanzen (z.B. Wasser) ermöglicht werden. Dazwischen befindet sich der schmale _____ . Im Inneren sind Chloroplasten mit einer plasmatischen Grundsubstanz ausgefüllt (_____), die Enzyme, ringförmige _____ und _____ enthält. Darüber hinaus ist das Stroma von _____ durchzogen. An etlichen Stellen sind flache, runde Ausstülpungen dieser Membran „geldrollenartig“ übereinander gelagert. Einen solchen Thylakoidstapel nennt man _____. Neben den Proteinen der Photosynthese befinden sich auch _____ zur Energiegewinnung in der Membran.

Beantworte die Umfrage „Aufgabe 1: Chloroplast“ auf dem Tablet!

2. Vervollständige mithilfe der App den vorliegenden Lückentext, indem du die einzelnen Bestandteile des Mitochondriums benennst.

Mitochondrien sind von zwei Zellmembranen umgeben, der _____ und der _____. Während der Raum zwischen den zwei Membranen als _____ bezeichnet wird, liegt im Inneren des Mitochondriums die sogenannte _____. Die innere Mitochondrienmembran ist stark gefaltet. Diese Einstülpungen werden auch als _____ bezeichnet und dienen der Oberflächenvergrößerung. Hier befinden sich auch die Proteine der Atmungskette, die _____. Im Matrixraum liegt die Erbinformation, wodurch Mitochondrien als autonomes Organell fungieren und sich unabhängig vom Zellzyklus der Zelle teilen. Mitochondrien haben ihre eigene DNA, die _____. Sie ist ringförmig und stammt evolutionär gesehen wahrscheinlich von der Einwanderung eines Bakteriums in einen Vorgänger der eukaryotischen Zelle ab. Für diese Theorie spricht auch die Tatsache, dass sich in der Matrix _____ befinden, diese sind typisch für prokaryotische Zellen. In eukaryotischen Zellen finden sich hingegen stets **80S**-Ribosomen.

Beantworte die Umfrage „Aufgabe 2: Mitochondrium“ auf dem Tablet!



TECHNISCHE UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN Aufbau von Chloroplasten und Mitochondrien **didaktik Biologie**

1. Vervollständige mithilfe der App den vorliegenden Lückentext, indem du die einzelnen Bestandteile des Chloroplasten benennst.

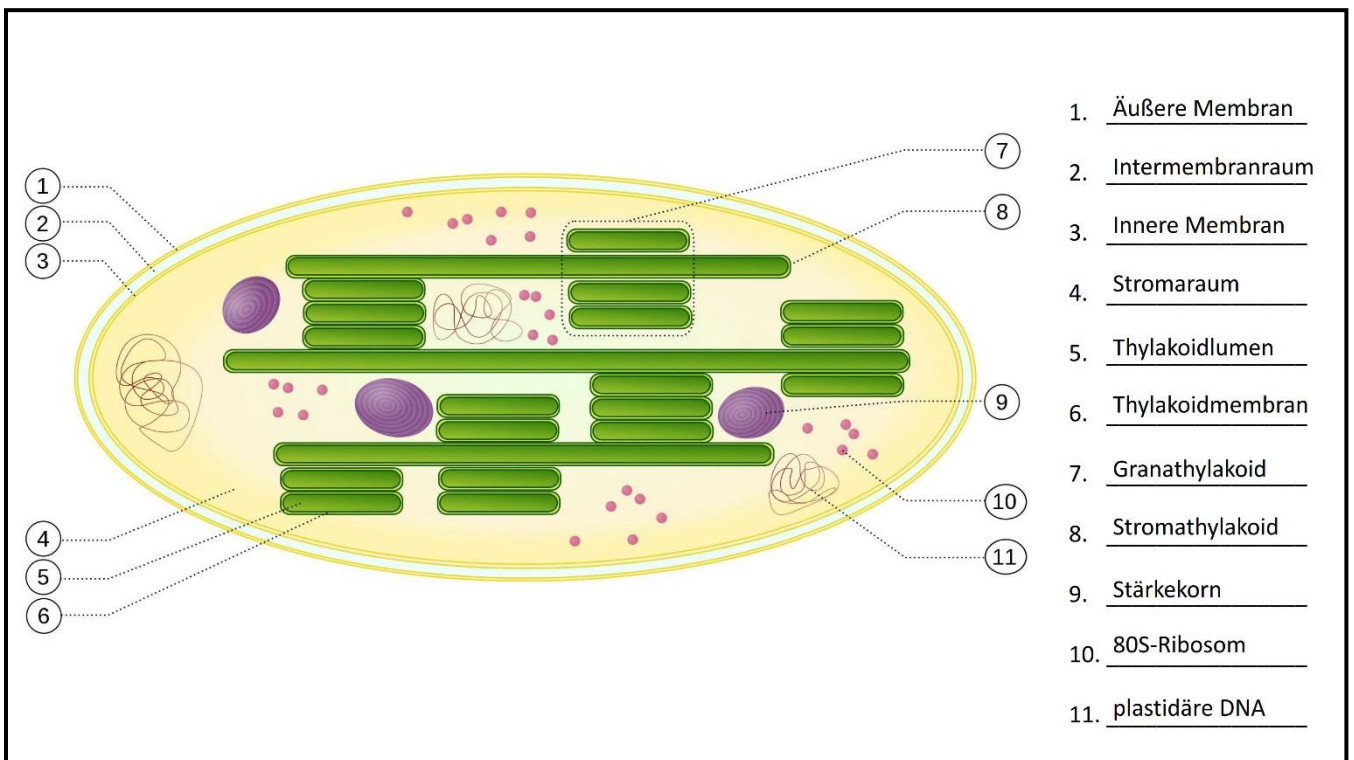
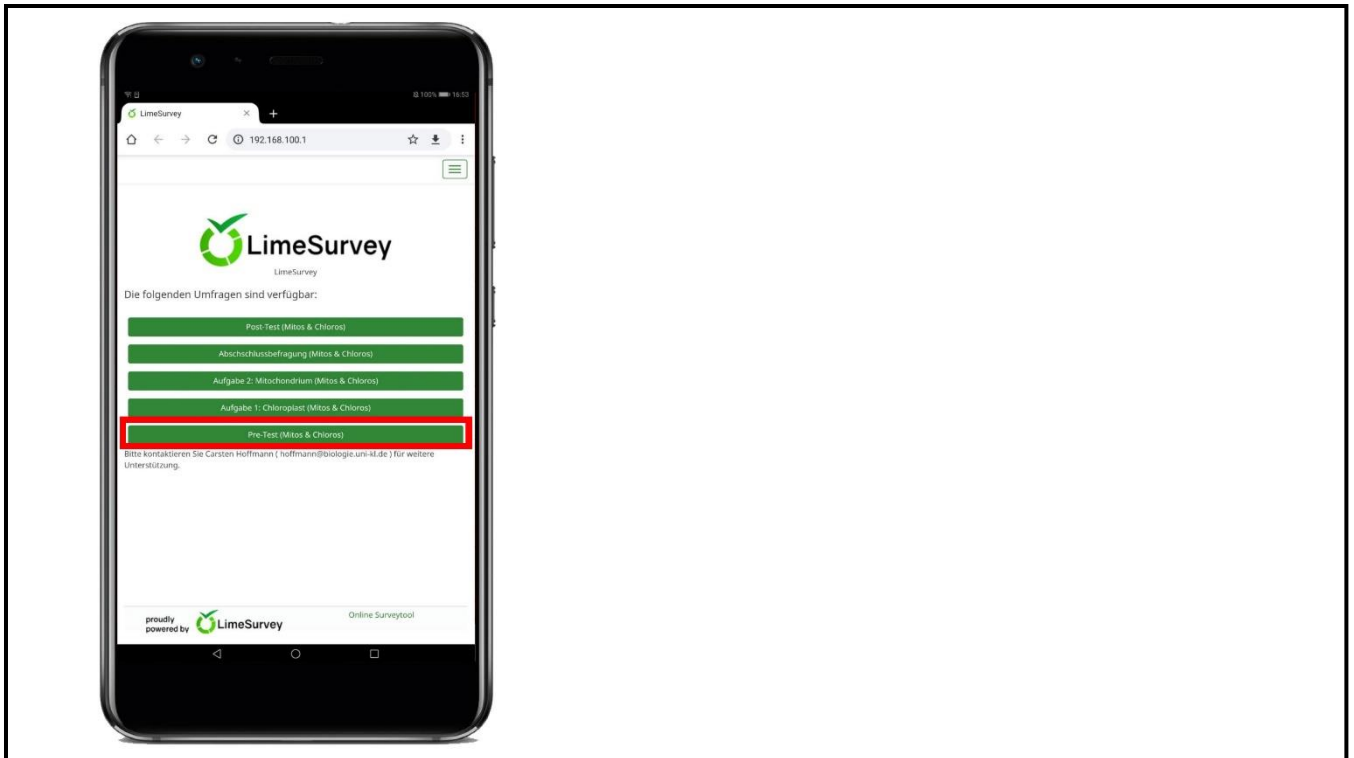
Bei Chloroplasten (griech. chloros = grün) handelt es sich um jene Organellen, die den Pflanzen und Algen ihre typisch grüne Farbe verleihen. Einzelne Chloroplasten sind etwa 5-6 µm (Mikrometer) lang. Chloroplasten sind von zwei Zellmembranen umschlossen, der _____ und der _____ über welche die Abgabe und die Aufnahme von Substanzen (z.B. Wasser) ermöglicht werden. Dazwischen befindet sich der schmale _____ . Im Inneren sind Chloroplasten mit einer plasmatischen Grundsubstanz ausgefüllt (_____), die Enzyme, ringförmige _____ und _____ enthält. Darüber hinaus ist das Stroma von _____ durchzogen. An etlichen Stellen sind flache, runde Ausstülpungen dieser Membran „geldrollenartig“ übereinander gelagert. Einen solchen Thylakoidstapel nennt man _____. Neben den Proteinen der Photosynthese befinden sich auch _____ zur Energiegewinnung in der Membran.

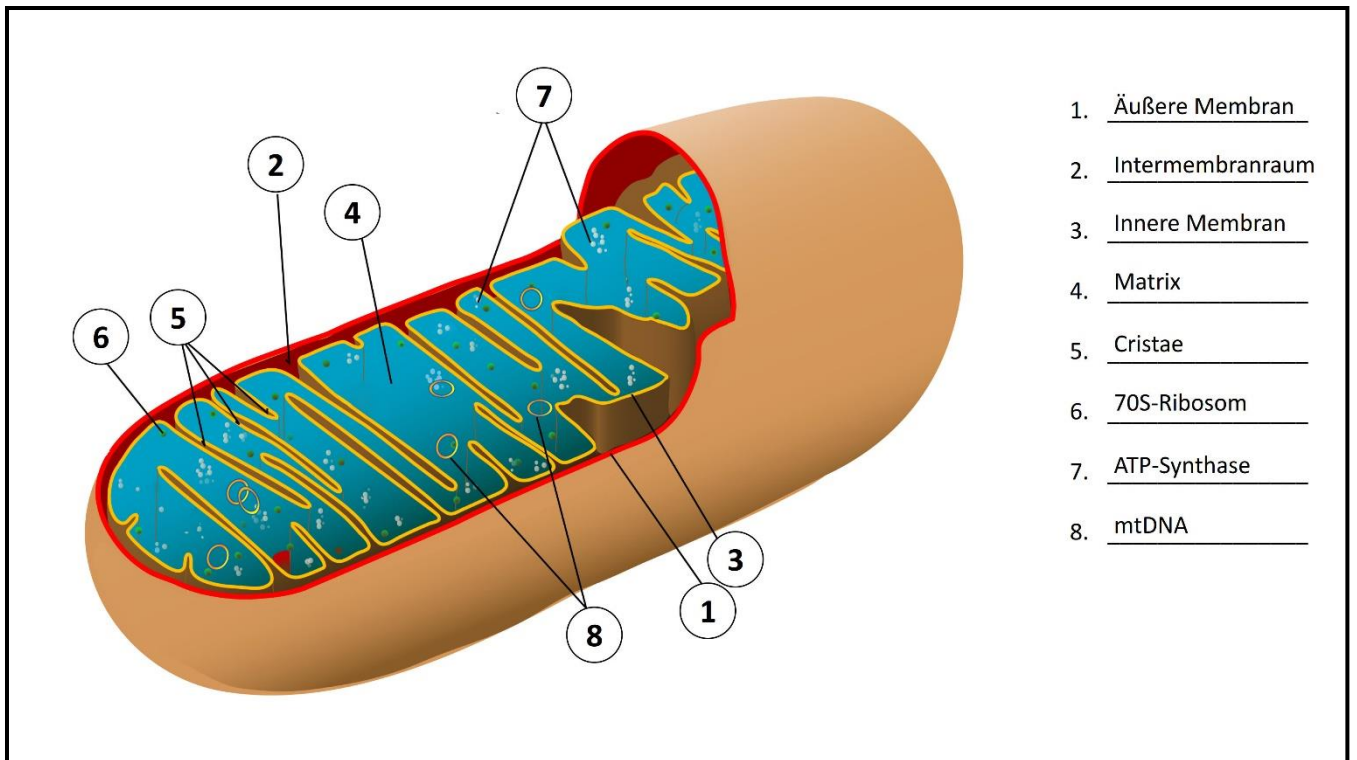
Beantworte die Umfrage „Aufgabe 1: Chloroplast“ auf dem Tablet!

2. Vervollständige mithilfe der App den vorliegenden Lückentext, indem du die einzelnen Bestandteile des Mitochondriums benennst.

Mitochondrien sind von zwei Zellmembranen umgeben, der _____ und der _____. Während der Raum zwischen den zwei Membranen als _____ bezeichnet wird, liegt im Inneren des Mitochondriums die sogenannte _____. Die innere Mitochondrienmembran ist stark gefaltet. Diese Einstülpungen werden auch als _____ bezeichnet und dienen der Oberflächenvergrößerung. Hier befinden sich auch die Proteine der Atmungskette, die _____. Im Matrixraum liegt die Erbinformation, wodurch Mitochondrien als autonomes Organell fungieren und sich unabhängig vom Zellzyklus der Zelle teilen. Mitochondrien haben ihre eigene DNA, die _____. Sie ist ringförmig und stammt evolutionär gesehen wahrscheinlich von der Einwanderung eines Bakteriums in einen Vorgänger der eukaryotischen Zelle ab. Für diese Theorie spricht auch die Tatsache, dass sich in der Matrix _____ befinden, diese sind typisch für prokaryotische Zellen. In eukaryotischen Zellen finden sich hingegen stets **80S**-Ribosomen.

Beantworte die Umfrage „Aufgabe 2: Mitochondrium“ auf dem Tablet!





1.2.2 Arbeitsblatt

1. Vervollständige mithilfe der App den vorliegenden Lückentext, indem du die einzelnen Bestandteile des Chloroplasten benennst.

Bei Chloroplasten (griech. chloros = grün) handelt es sich um jene Organellen, die den Pflanzen und Algen ihre typisch grüne Farbe verleihen. Einzelne Chloroplasten sind etwa 5-6 μm (Mikrometer) lang. Chloroplasten sind von zwei Zellmembranen umschlossen, der _____ und der _____, über welche die Abgabe und die Aufnahme von Substanzen (z.B. Wasser) ermöglicht werden. Dazwischen befindet sich der schmale _____. Im Inneren sind Chloroplasten mit einer plasmatischen Grundsubstanz ausgefüllt (_____), die Enzyme, ringförmige _____, _____ und _____ enthält. Darüber hinaus ist das Stroma von _____ durchzogen. An etlichen Stellen sind flache, runde Ausstülpungen dieser Membran „geldrollenartig“ übereinander gelagert. Einen solchen Thylakoidstapel nennt man _____. Neben den Proteinen der Photosynthese befinden sich auch _____ zur Energiegewinnung in der Membran.



Beantworte die Umfrage „Aufgabe 1: Chloroplast“ auf dem Tablet!

2. Vervollständige mithilfe der App den vorliegenden Lückentext, indem du die einzelnen Bestandteile des Mitochondriums benennst.

Mitochondrien sind von zwei Zellmembranen umgeben, der _____ und der _____. Während der Raum zwischen den zwei Membranen als _____ bezeichnet wird, liegt im Inneren des Mitochondriums die sogenannte _____. Die innere Mitochondrienmembran ist stark gefaltet. Diese Einstülpungen werden auch als _____ bezeichnet und dienen der Oberflächenvergrößerung. Hier befinden sich auch die Proteine der Atmungskette, die _____. Im Matrixraum liegt die Erbinformation, wodurch Mitochondrien als autonomes Organell fungieren und sich unabhängig vom Zellzyklus der Zelle teilen. Mitochondrien haben ihre eigene DNA, die _____ (_____). Sie ist ringförmig und stammt evolutionär gesehen wahrscheinlich von der Einwanderung eines Bakteriums in einen Vorgänger der eukaryotischen Zelle ab. Für diese Theorie spricht auch die Tatsache, dass sich in der Matrix _____ befinden, diese sind typisch für prokaryotische Zellen. In eukaryotischen Zellen finden sich hingegen stets 80S-Ribosomen.



Beantworte die Umfrage „Aufgabe 2: Mitochondrium“ auf dem Tablet!

3. Vervollständige mithilfe der App den vorliegenden Lückentext, indem du die einzelnen Bestandteile des Chloroplasten benennst.

Bei Chloroplasten (griech. chloros = grün) handelt es sich um jene Organellen, die den Pflanzen und Algen ihre typisch grüne Farbe verleihen. Einzelne Chloroplasten sind etwa 5-6 μm (Mikrometer) lang. Chloroplasten sind von zwei Zellmembranen umschlossen, der **äußeren-** und **inneren Membran**, über welche die Abgabe und die Aufnahme von Substanzen (z.B. Wasser) ermöglicht werden. Dazwischen befindet sich der schmale **Intermembranraum**. Im Inneren sind Chloroplasten mit einer plasmatischen Grundsubstanz ausgefüllt (**Stroma**), die Enzyme, ringförmige **DNA**, **Ribosomen** und **Stärkekörner** enthält. Darüber hinaus ist das Stroma von **Thylakoidmembranen** durchzogen. An etlichen Stellen sind flache, runde Ausstülpungen dieser Membran „geldrollenartig“ übereinander gelagert. Einen solchen Thylakoidstapel nennt man **Granum**. Neben den Proteinen der Photosynthese befinden sich auch **ATP-Synthasen** zur Energiegewinnung in der Membran.



Beantworte die Umfrage „Aufgabe 1: Chloroplast“ auf dem Tablet!

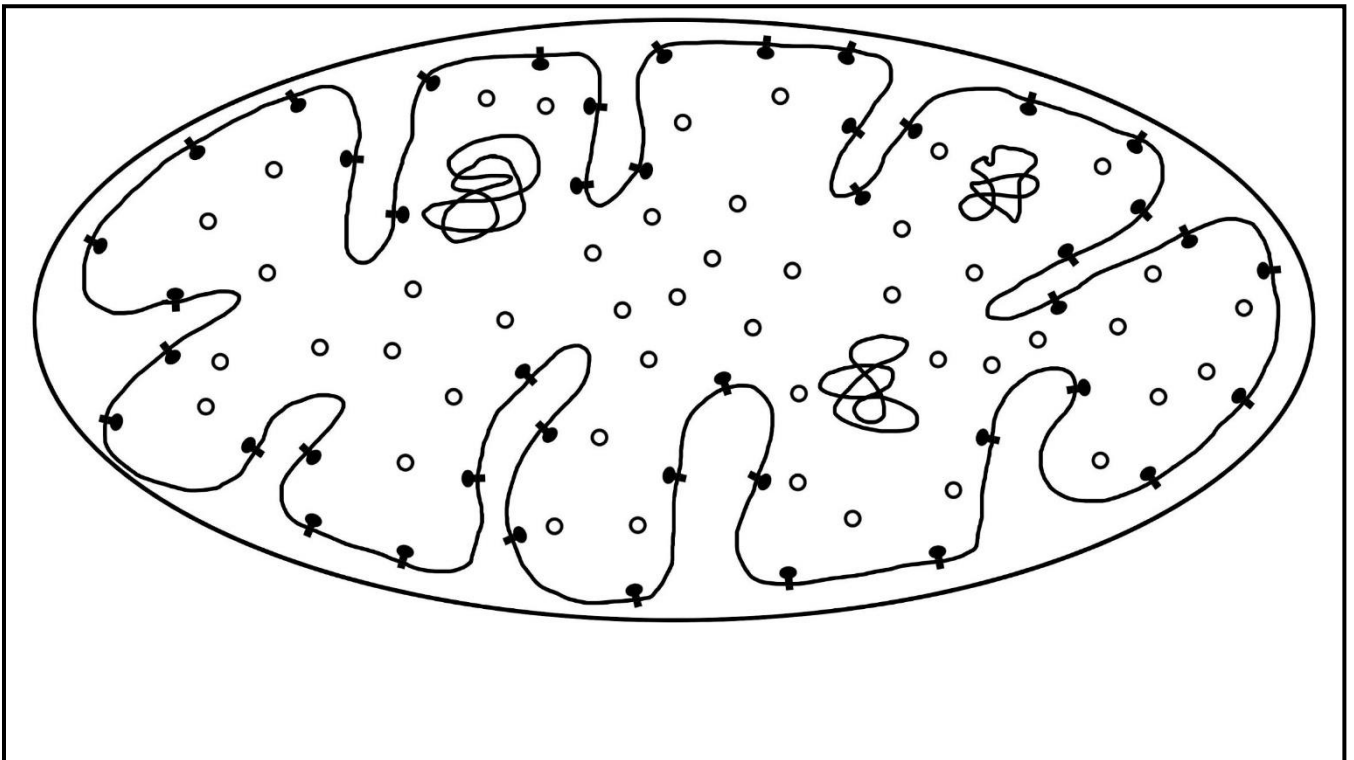
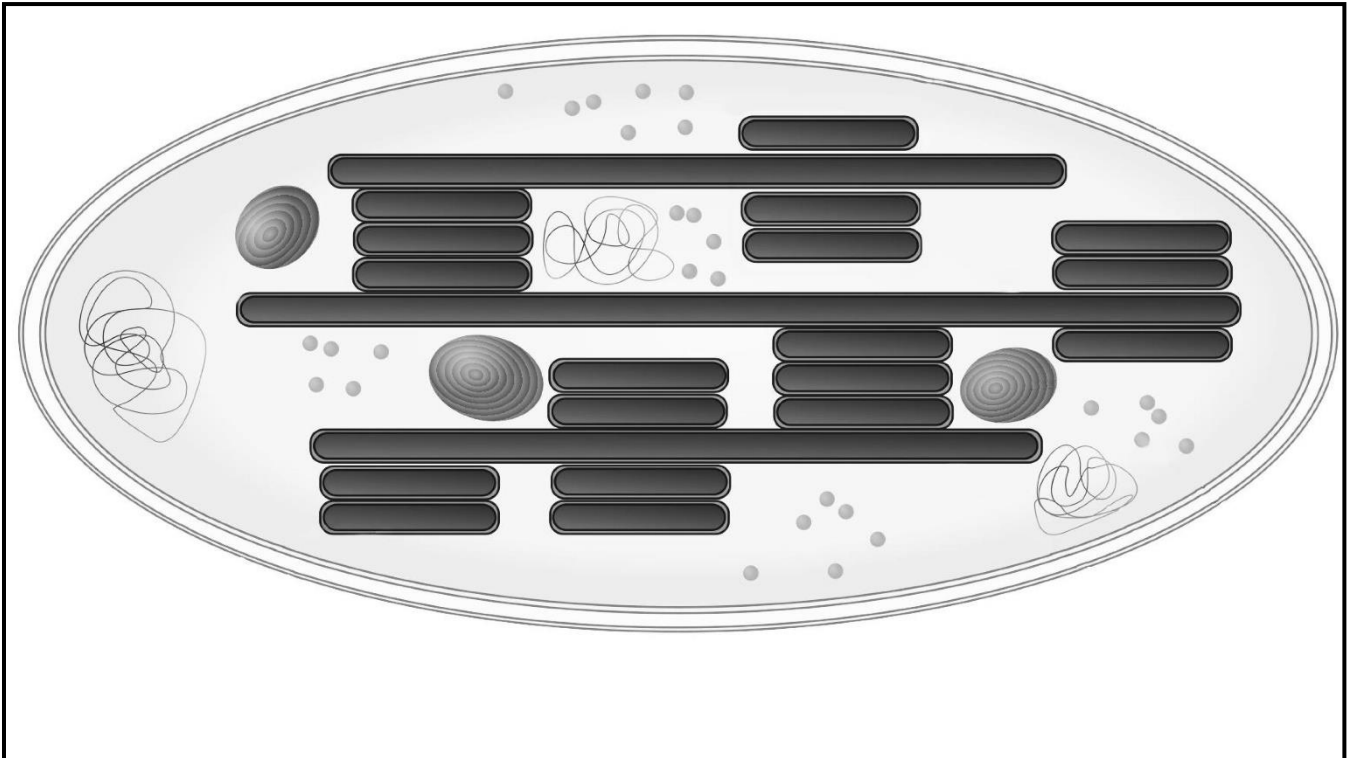
4. Vervollständige mithilfe der App den vorliegenden Lückentext, indem du die einzelnen Bestandteile des Mitochondriums benennst.

Mitochondrien sind von zwei Zellmembranen umgeben, der **äußeren** und der **inneren Membran**. Während der Raum zwischen den zwei Membranen als **Intermembranraum** bezeichnet wird, liegt im Inneren des Mitochondriums die sogenannte **Matrix**. Die innere Mitochondrienmembran ist stark gefaltet. Diese Einstülpungen werden auch als **Cristae** bezeichnet und dienen der Oberflächenvergrößerung. Hier befinden sich auch die Proteine der Atmungskette, die **ATP-Synthasen**. Im Matrixraum liegt die Erbinformation, wodurch Mitochondrien als autonomes Organell fungieren und sich unabhängig vom Zellzyklus der Zelle teilen. Mitochondrien haben ihre eigene DNA, die **mitochondriale DNA (mDNA)**. Sie ist ringförmig und stammt evolutionär gesehen wahrscheinlich von der Einwanderung eines Bakteriums in einen Vorgänger der eukaryotischen Zelle ab. Für diese Theorie spricht auch die Tatsache, dass sich in der Matrix **70S-Ribosomen** befinden, diese sind typisch für prokaryotische Zellen. In eukaryotischen Zellen finden sich hingegen stets 80S-Ribosomen.







Beantworte die Umfrage „Aufgabe 2: Mitochondrium“ auf dem Tablet!

1.2.3 Triggerbilder für AR-Anwendung



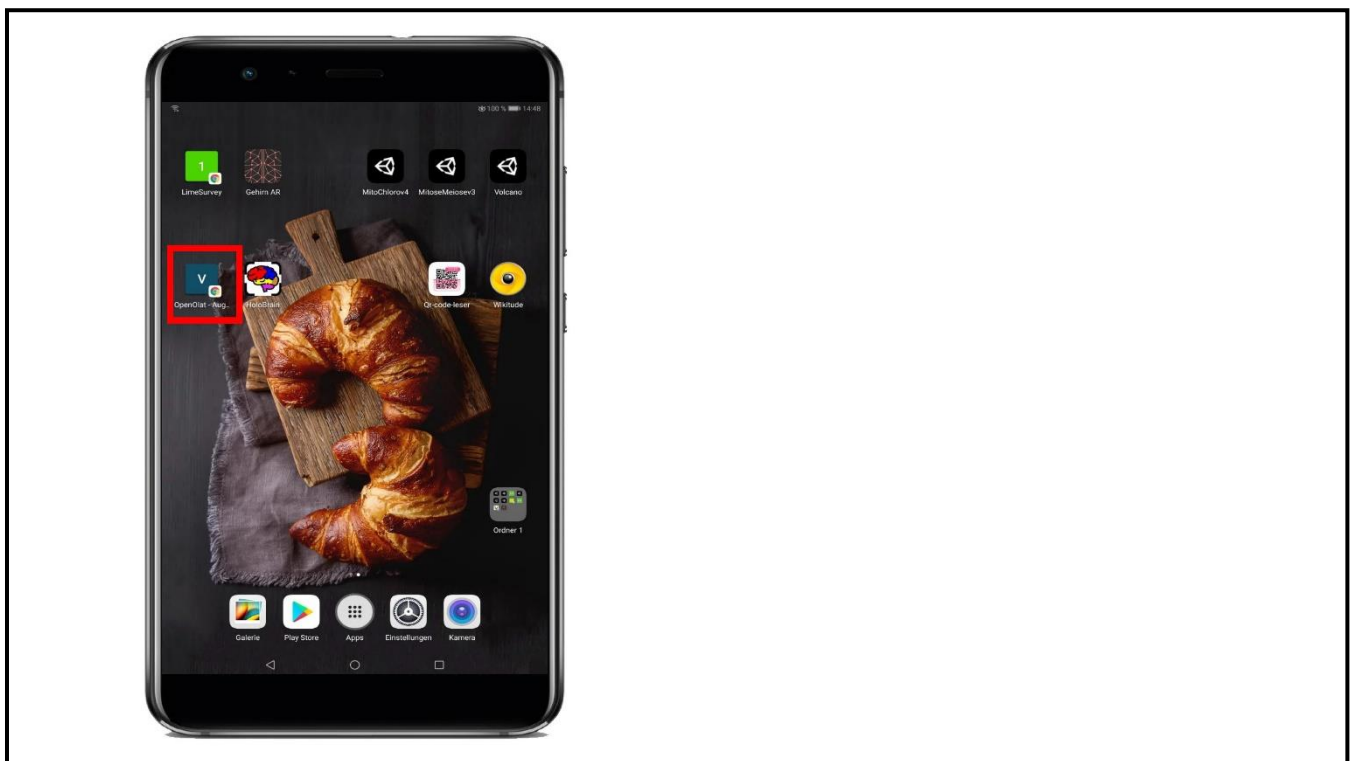
1.3 Studie HoloBrain

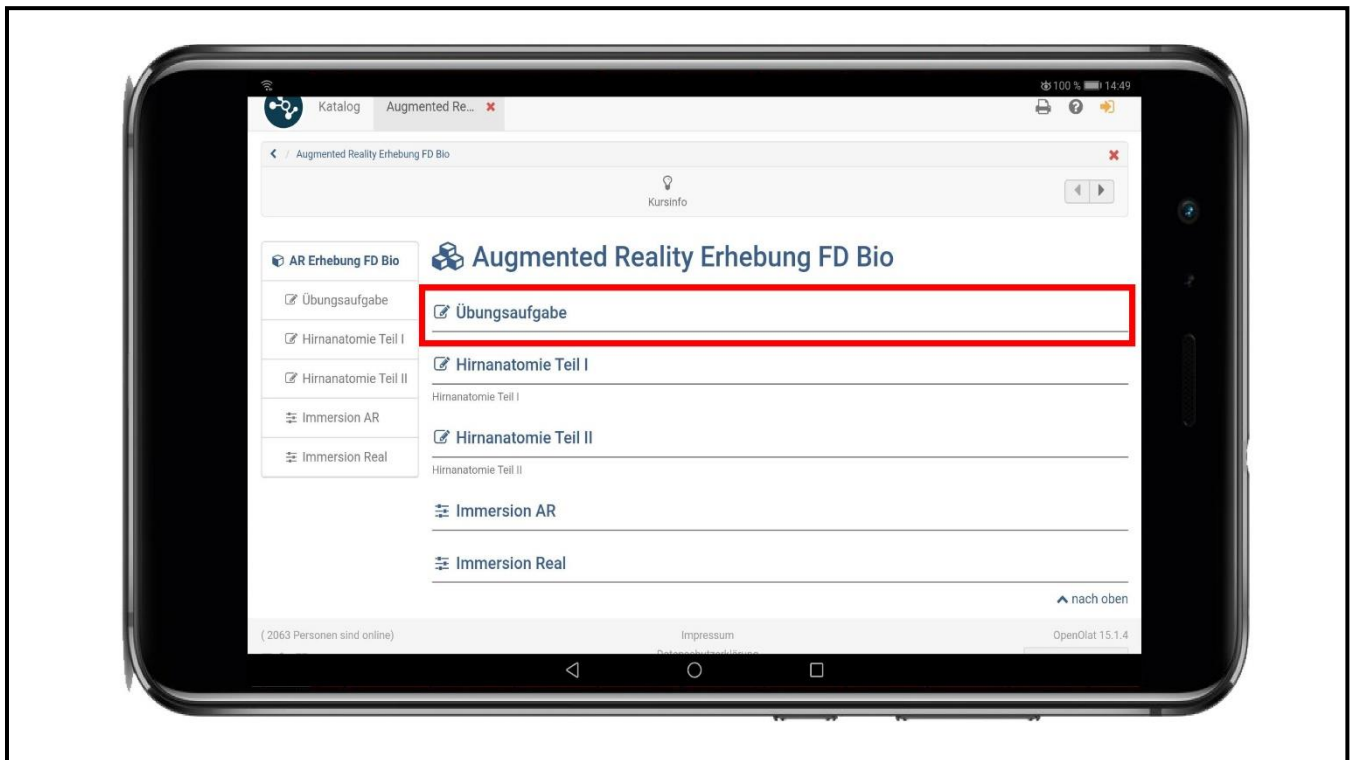
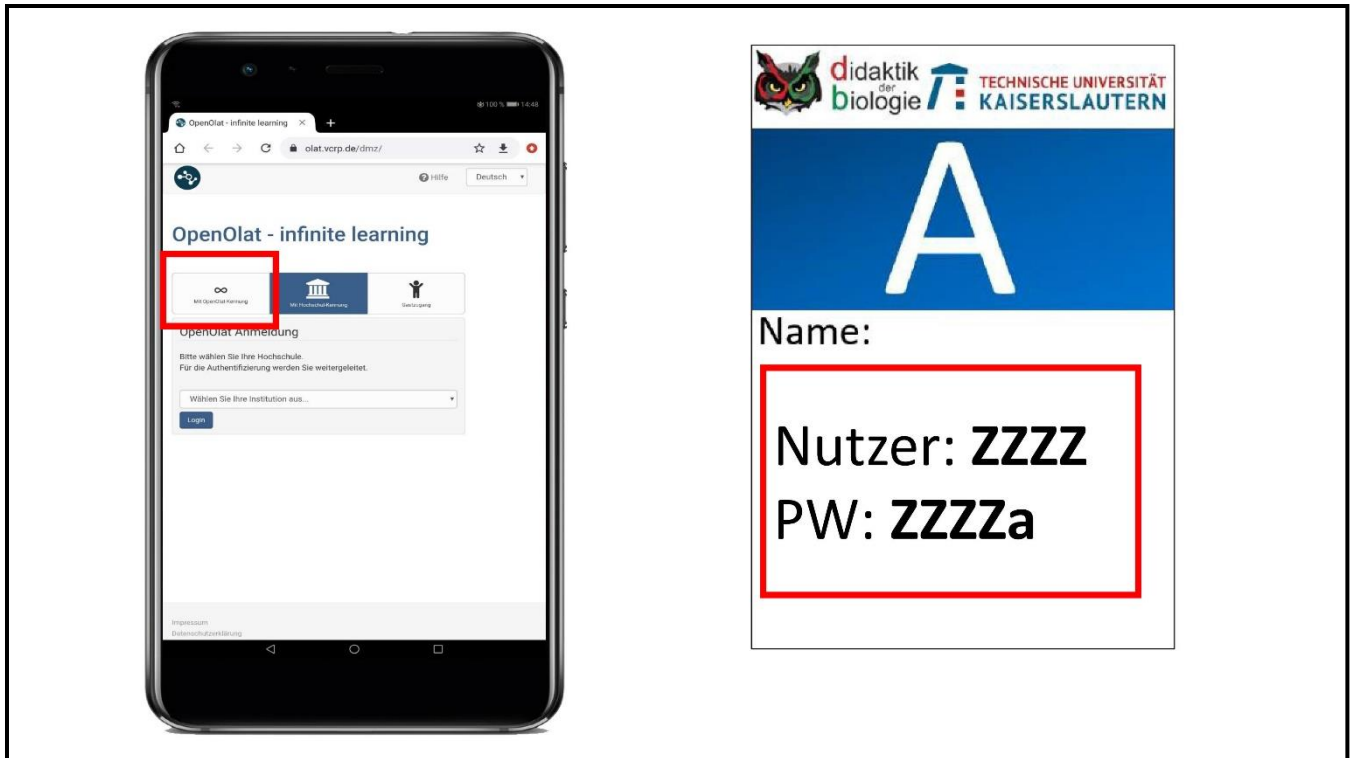
1.3.1 Einführungsfolien und Organisation

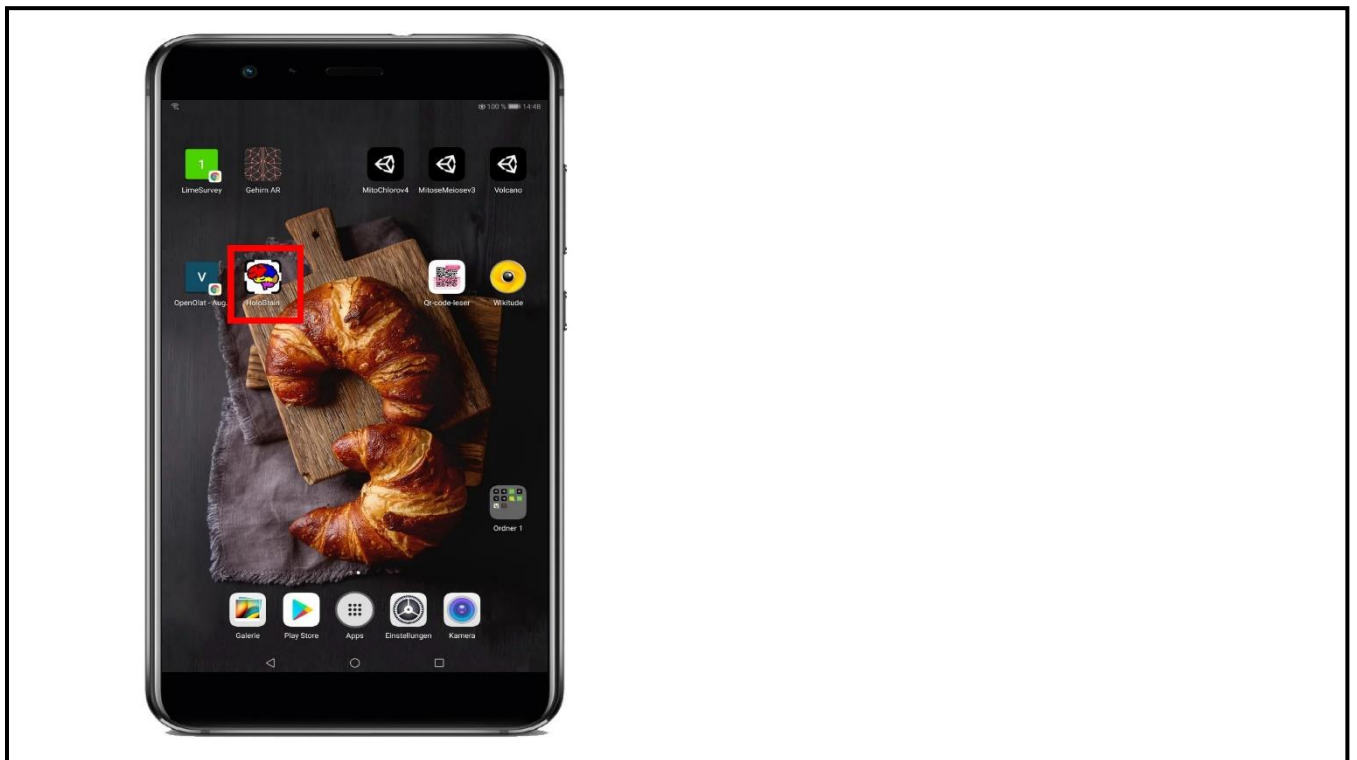
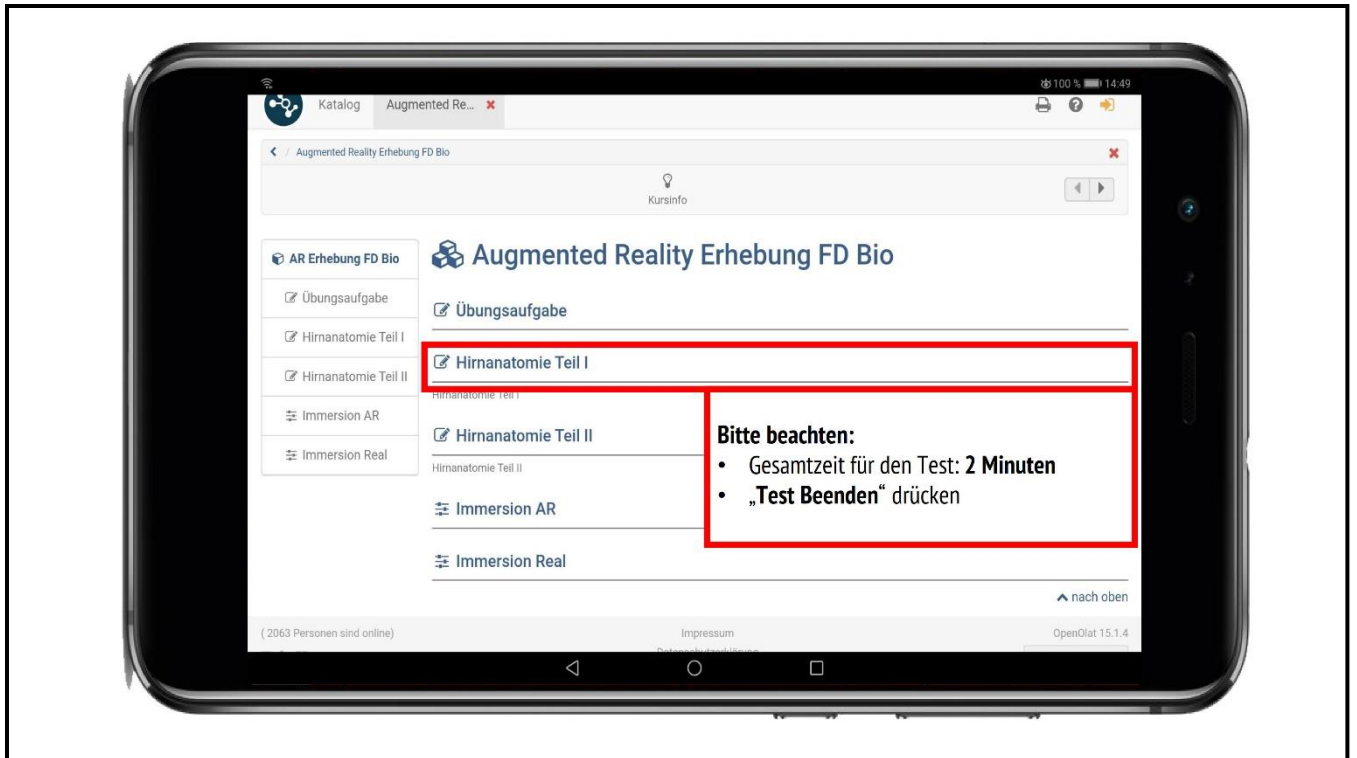
vorne	hinten
	
	

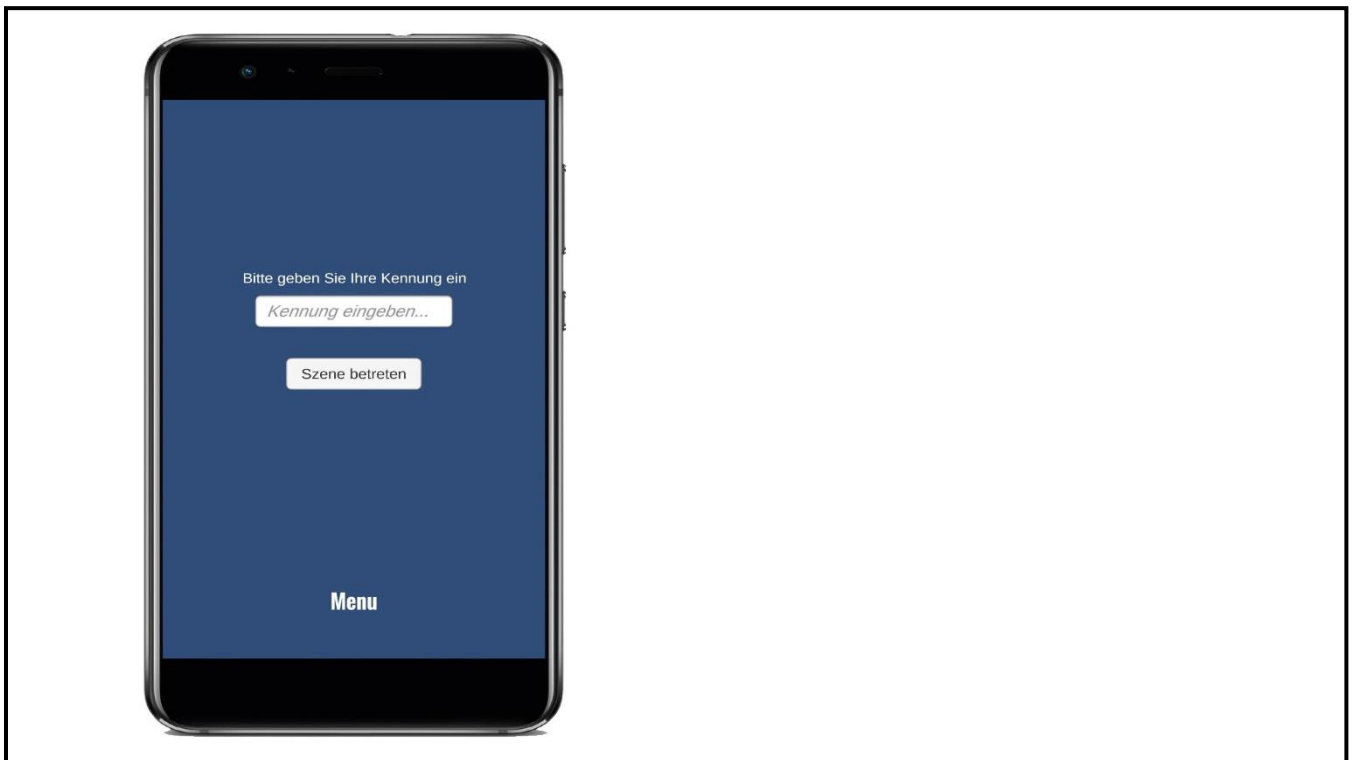
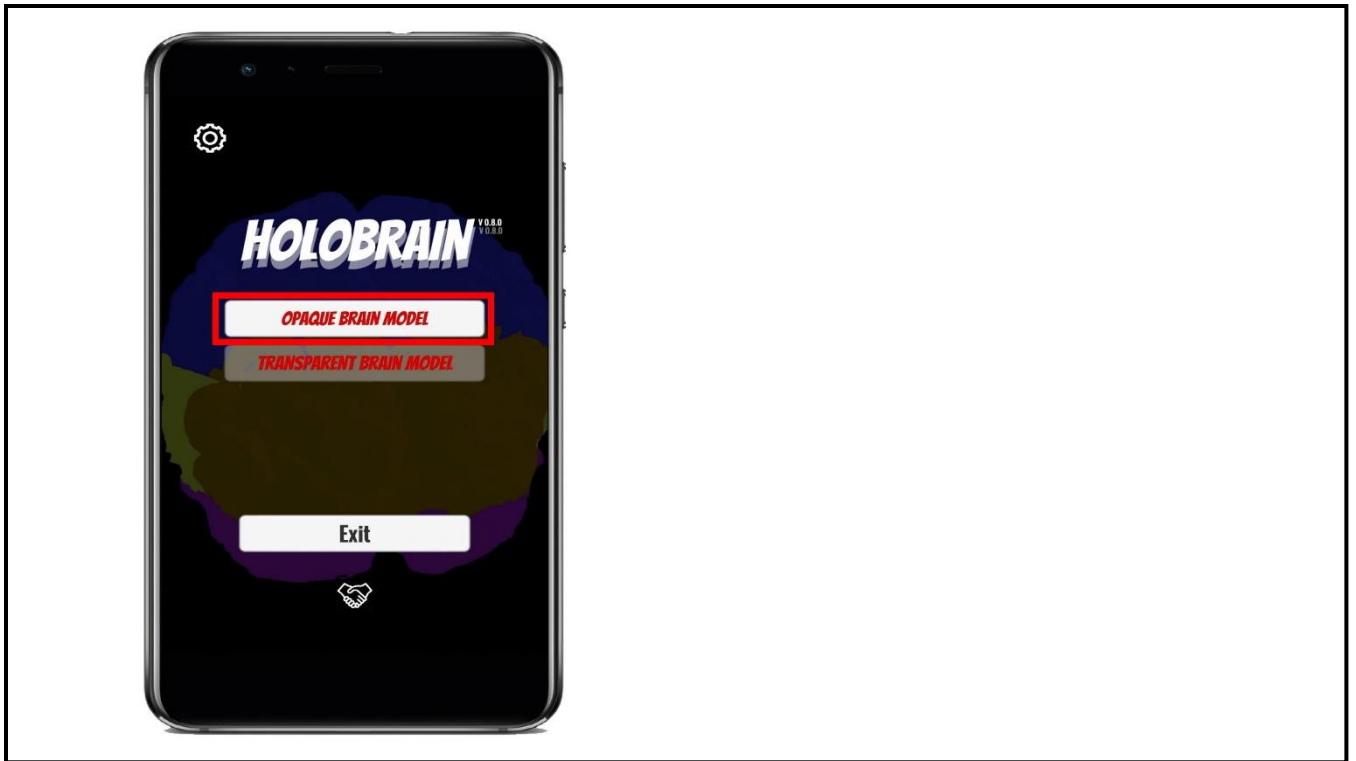
Gruppe und Kennung
bitte immer angeben wenn gefragt!

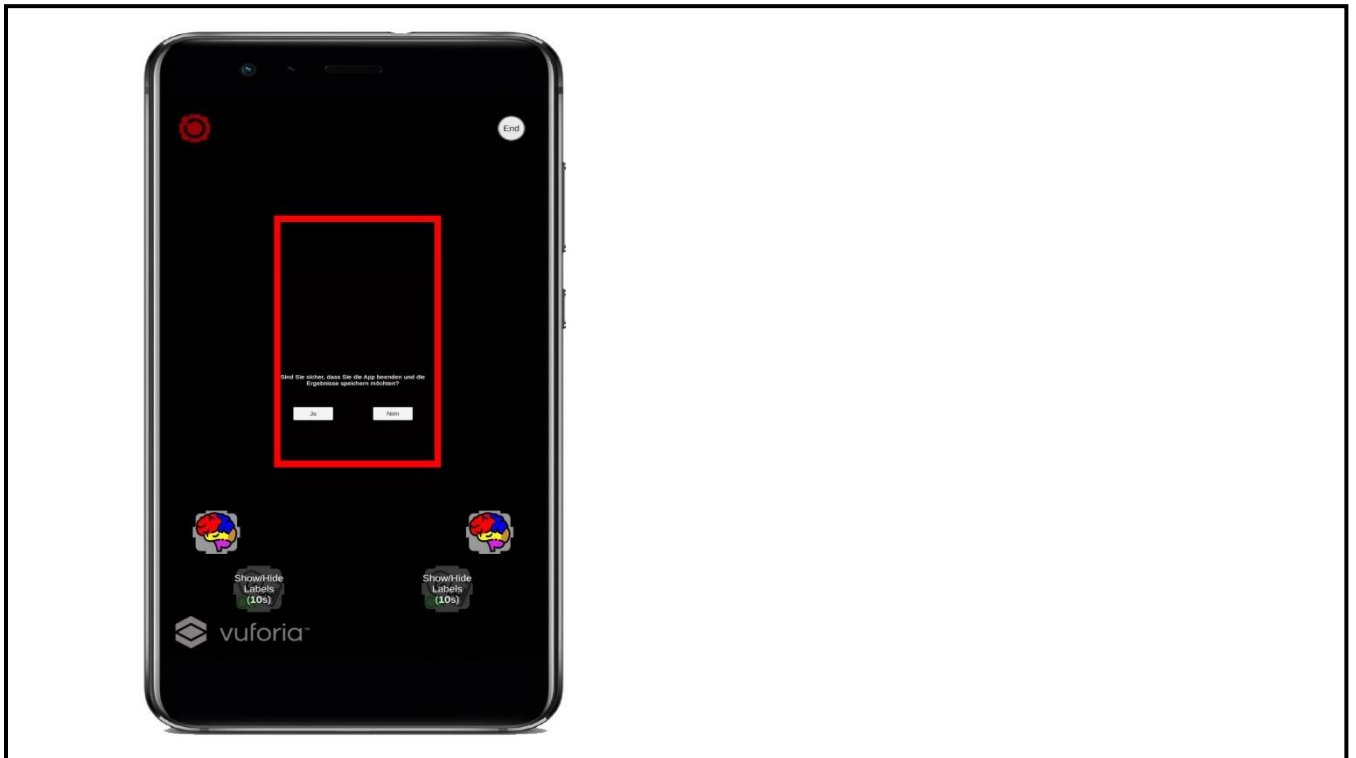
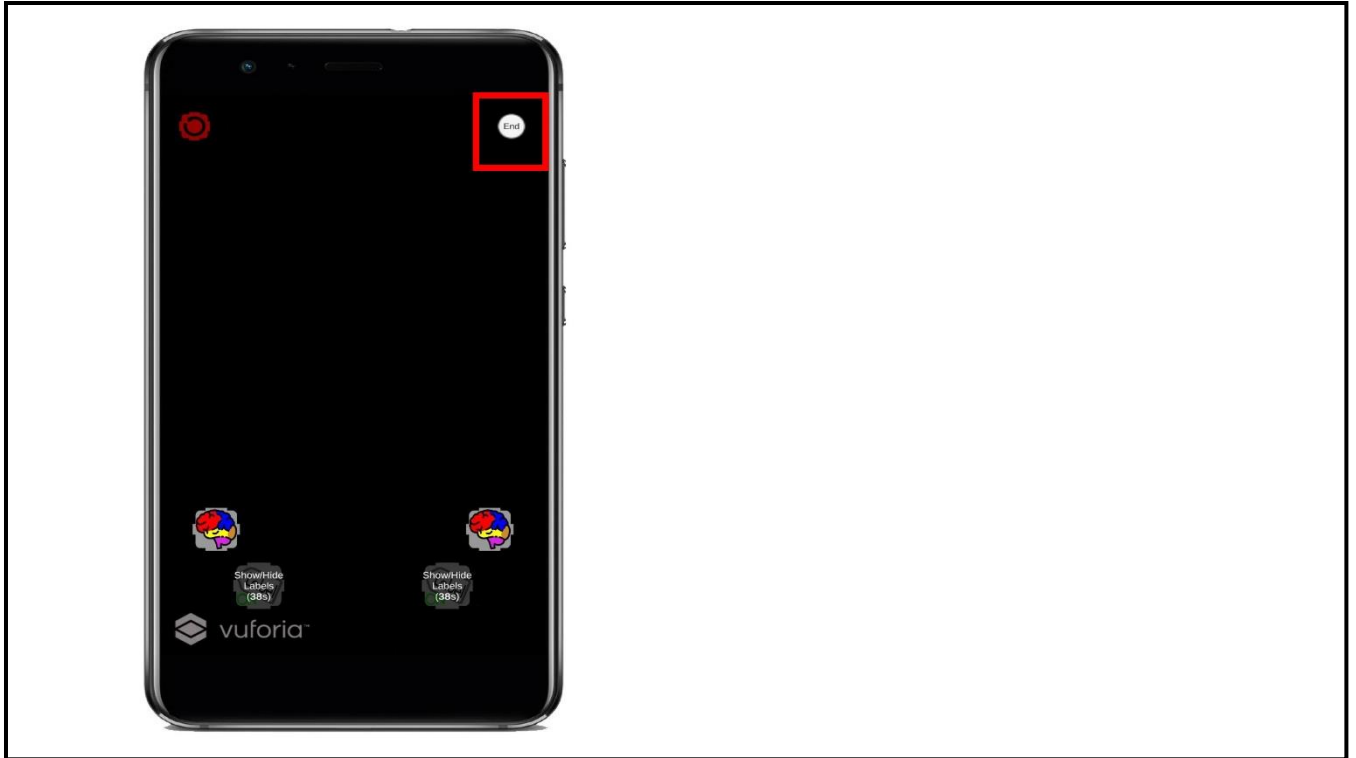
Bitte NIE den Namen eingeben!

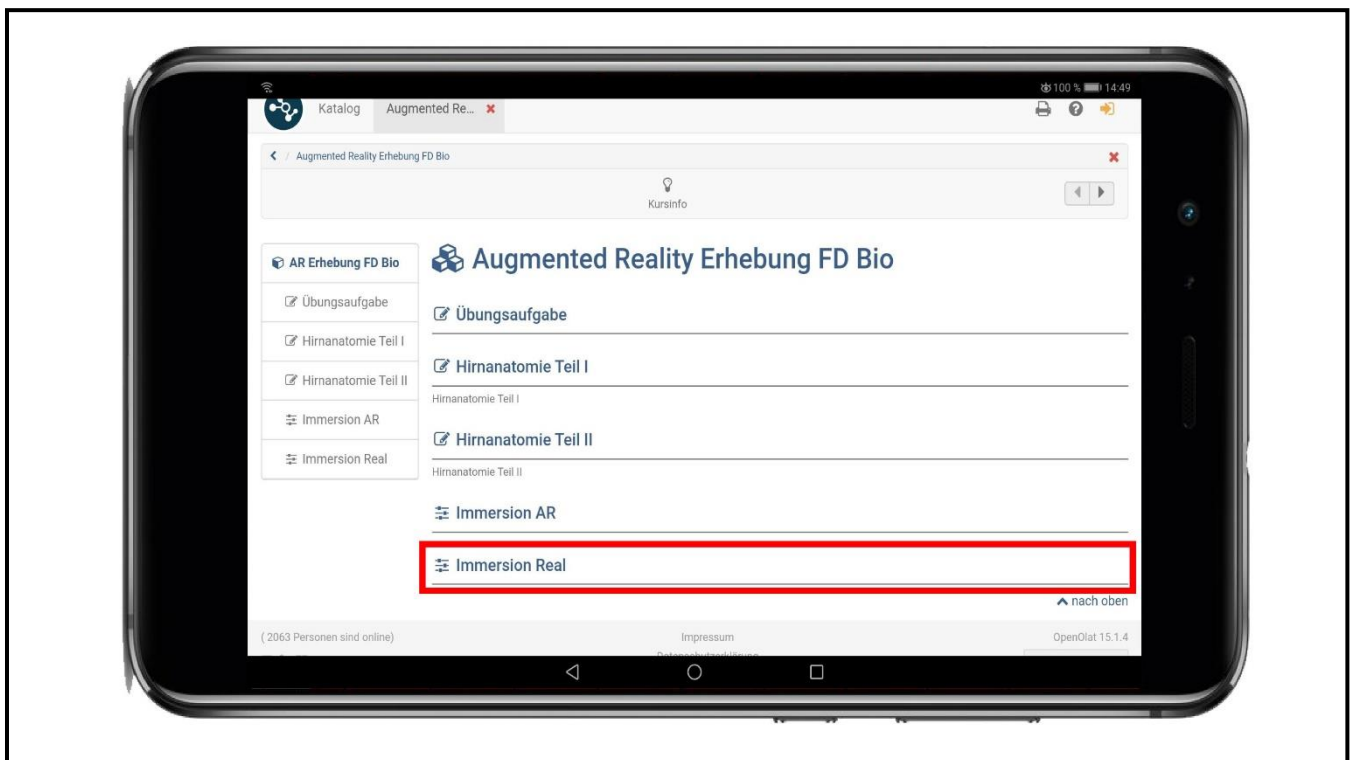
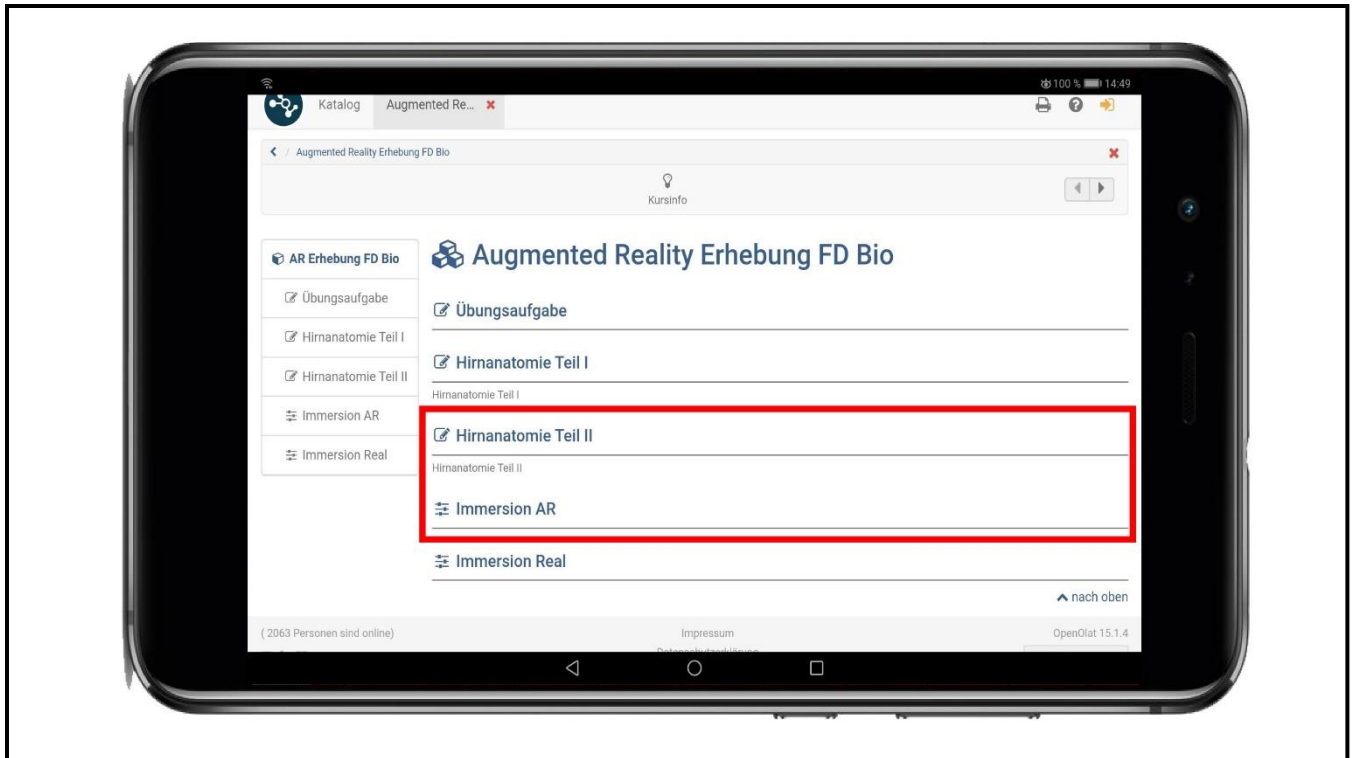












Was versteht man unter Immersion?

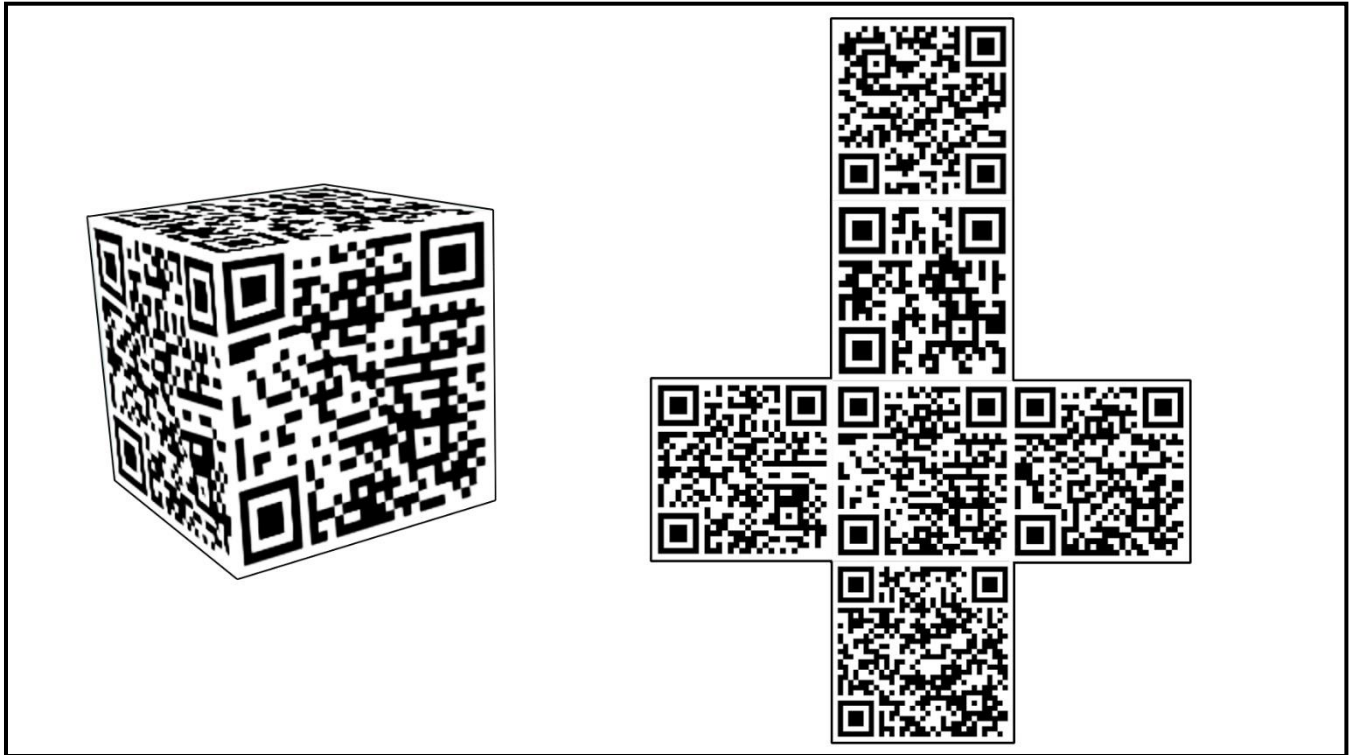
“the participant's suspension of disbelief that she or he is **'inside' a digitally enhanced setting**”
(Dede, 2009, p.66)

„a natural human state, which emerges as people engage in an **engrossing activity**, such as, for instance, when reading an enjoyable book, watching a film or playing a digital game“ (Weibel et al., 2010).

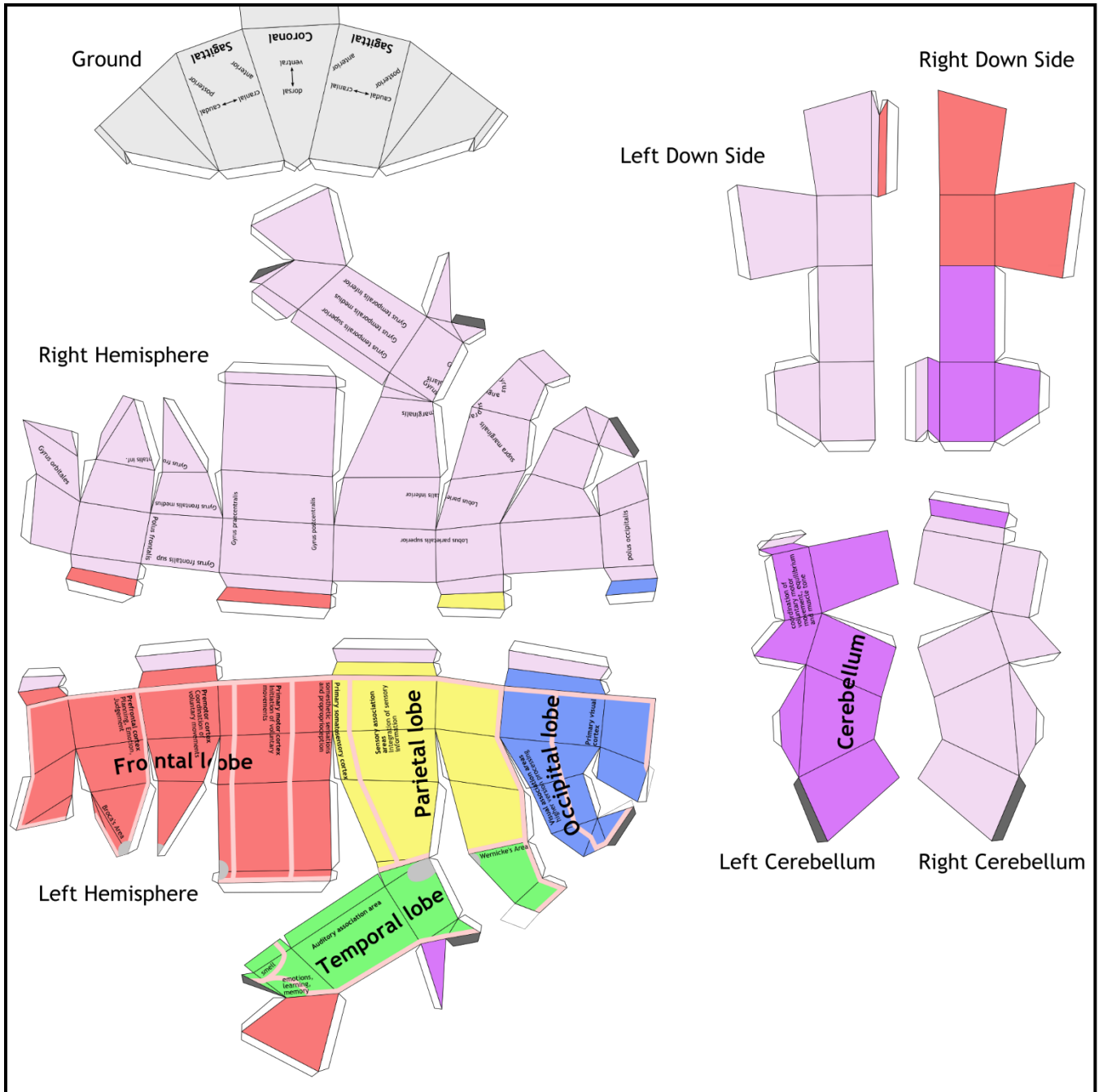
„immersive experiences, which in turn are asserted to promote **enjoyment, engagement in a task and even learning**“
(Dede, 2009; De Souza E Silva and Delacruz, 2006).

„to be immersed is to be **involved in a given context**, not only **physically** but also **mentally** and **emotionally**.“ (Cheng et al., 2015; Brown and Cairns, 2004)

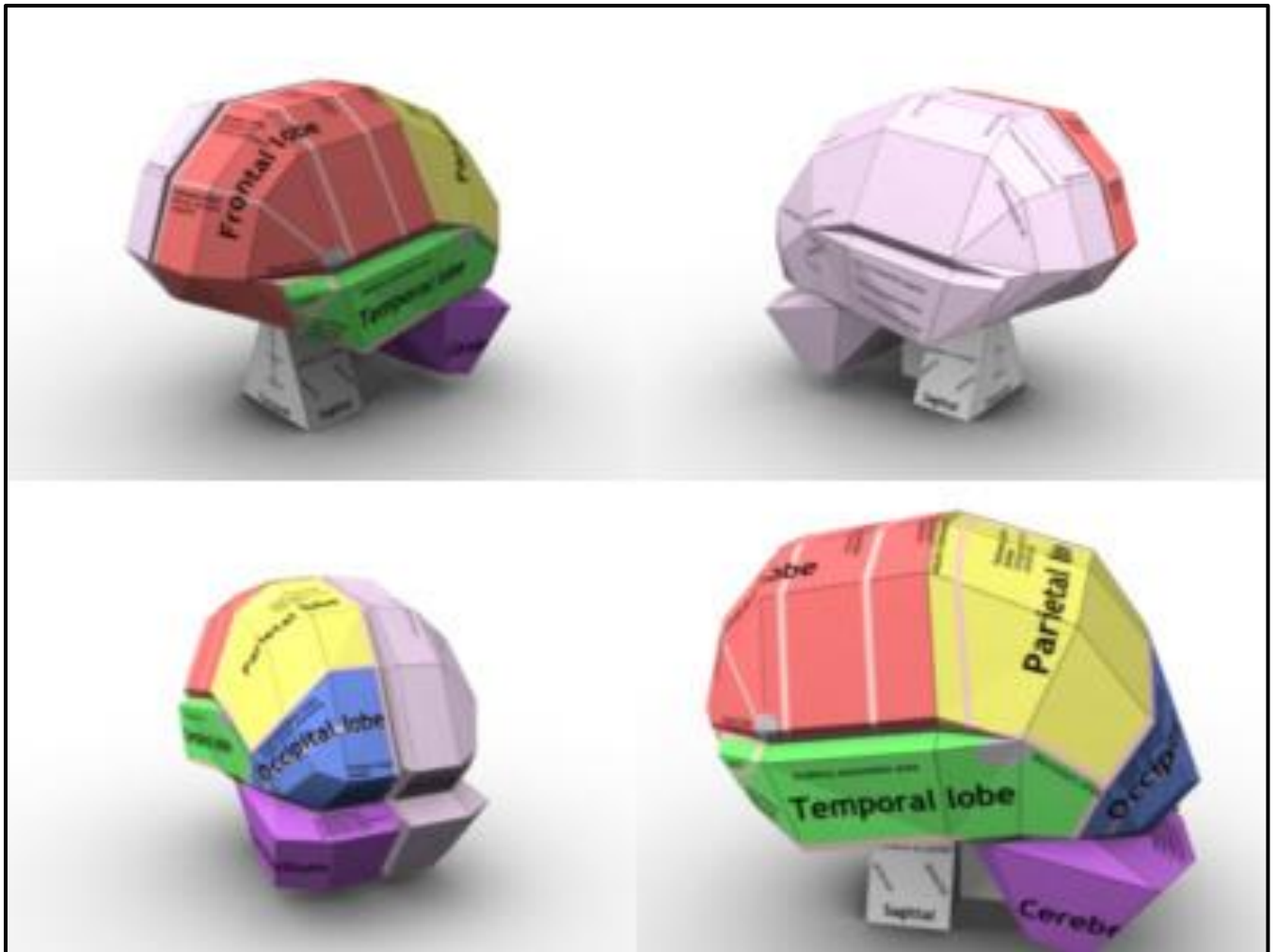
1.3.2 3D QR-Cube



1.3.3 Papiermodell



Bildquelle: Pyka (o. J.)



Bildquelle: Pyka (o. J.)

2 Organisatorisches und Datenerhebung

2.1 Allgemein

2.1.1 Untersuchungsanzeige bei der ADD

Um die Studien an rheinland-pfälzischen Gymnasien durchführen zu können, musste vorab eine entsprechende Anzeige an die Aufsichts- und Dienstleistungsdirektion (ADD) gestellt werden. Der geplante Untersuchungszeitraum konnte nach Genehmigung formlos verlängert werden.

Anzeige einer wissenschaftlichen Untersuchung/Umfrage in Schulen

Thema der Untersuchung:

Potentiale von Augmented Reality (AR) basierten Lernumgebungen

Untersuchungsleitung (Antragssteller)/ Anschrift / E-Mailadresse / Telefon

Carsten Hoffmann / Emil-Heckel-Str. 12 / hoffmann@biologie.uni-kl.de /
0631-2054011

Universität und Betreuung/ Dozent/in

TU Kaiserslautern, Apl. Prof. Dr. Christoph Thyssen

Untersuchungsziel:

Erfassung der Lernwirksamkeit und des Cognitive Loads von Augmented Reality
basierten Lernumgebungen
Persönliche Meinungen zu Augmented Reality als Unterrichtsmedium

Art der Untersuchung:

- Umfrage/ Befragung
 - Online-Befragung
 - Papier-Befragung
- Interview/ Gespräch
- Unterrichtsbeobachtung/Hospitation
- Videoaufzeichnung Audioaufzeichnung
- sonstige:

Untersuchungsgrund:

- Bachelor-/Masterarbeit
- Dissertation/ Examen
- Forschungsprojekt
- sonstige:

Schulart:

- Grundschulen
- Gymnasien
- Realschulen plus
- Integrierte Gesamtschulen

- Berufsbildende Schulen
- sonstige:

Zielgruppe :

- Schülerinnen/Schüler
 - Schülerinnen/Schüler bis 14. Jahre
 - Schülerinnen/Schüler 14. bis 18 Jahre
 - volljährige Schülerinnen/Schüler
- Lehrkräfte
- Eltern bzw. Sorgeberechtigte
- Schulleitung
- Sonstige

Geplanter Untersuchungszeitraum:

01.01.2019 – 31.06.2019

Mir ist bekannt, dass von Seiten der ADD Trier innerhalb von drei Wochen nach Eingang dieser Untersuchungsanzeige weitere Unterlagen nachgefordert werden können oder die generelle Genehmigung ausgesetzt werden kann und dass in diesem Fall eine gesonderte Einzelfallgenehmigung abgewartet werden muss.

Datum/ Unterschrift

Im Falle der Untersuchungsleitung durch Studierende Unterschrift der betreuenden Dozentin/des betreuenden Dozenten:

Datum/Unterschrift

2.1.2 Einverständnis- und Datenschutzerklärung

Informationsschreiben für die Teilnehmerinnen und Teilnehmer

Carsten Hoffmann
Emil-Heckel-Str. 12
68163 Mannheim
hoffmann@biologie.uni-kl.de

Wissenschaftliche Studie im Rahmen meiner Doktorarbeit:

„Potentiale von Augmented Reality (AR) basierten Lernumgebungen“

Sehr geehrte Damen und Herren, liebe Schülerinnen und Schüler,

im Rahmen meiner Doktorarbeit an der Technischen Universität Kaiserslautern, AG Didaktik der Biologie, Betreuer: Apl. Prof. Dr. Thyssen führe ich die Studie „Potentiale von Augmented Reality (AR) basierten Lernumgebungen“ durch. Dabei interessieren mich besonders die Lernwirksamkeit von AR, sowie die persönlichen Einstellungen von Schülerinnen und Schülern zu AR als Unterrichtsmedium.

Die Teilnahme an der Untersuchung ist selbstverständlich freiwillig und aus einer Nichtteilnahme entstehen keinerlei negative Folgen. Die erhobenen Daten werden anonymisiert ausgewertet und streng vertraulich behandelt. Die Auswertung erfolgt nur zu wissenschaftlichen Zwecken und eine Weitergabe der Daten an unbefugte Dritte ist ausgeschlossen. Ich wäre Ihnen sehr dankbar, wenn Sie meine Forschung unterstützen und an dieser Studie teilnehmen würden.

Für Rückfragen stehe ich Ihnen unter o. g. Kontaktdaten jederzeit gern zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen,

Carsten Hoffmann

Schriftliche Einverständniserklärung

Projekt: „Potentiale von Augmented Reality (AR) basierten Lernumgebungen“ – Einverständnis zur Teilnahme

Hiermit erkläre ich mich bereit an der Studie „Potentiale von Augmented Reality (AR) basierten Lernumgebungen“ teilzunehmen. Die nachfolgenden Hinweise zur Erhebung, Aufbewahrung und Vernichtung der Daten habe ich verstanden und akzeptiert.

Name (SchülerIn): _____

Vorname (SchülerIn): _____

Ort, Datum: _____ Unterschrift (SchülerIn): _____

Unterschrift (Erziehungsberechtigter): _____

Hinweise zur Datenerhebung, -aufbewahrung und Vernichtung

Die Befragung findet anonym statt. Die Namen der Teilnehmer werden im Fragebogen ebenso wenig erhoben wie andere sensible Informationen. Die erhobenen Daten werden nur in statistisch zusammengefasster Form dargestellt und vertraulich behandelt. Die Datenerhebung erfolgt dabei ausschließlich durch mit der Untersuchung befasste Personen. Unbefugte Dritte erhalten keinen Einblick in die Datenerhebung. Die von Ihnen angegebenen Daten werden ausschließlich zur Erstellung der Doktorarbeit gespeichert und verwendet. Die Rohdaten werden nach Ablauf einer Speicherfrist von 12 Monaten nach Projektende vernichtet. Ein Widerruf des Einverständnisses ist jederzeit ohne Angabe von Gründen und ohne damit verbundene Nachteile möglich. Weitere Informationen entnehmen Sie bitte der ‚Erklärung zur Datenerhebung‘.

Erklärung zur Datenerhebung

Ich nehme den Schutz Ihrer persönlichen Daten sehr ernst, daher findet die Befragung anonym statt. Dadurch können nachträglich keine Antworten zu einzelnen Personen zugeordnet werden. Daten werden nur in statistisch zusammengefasster Form dargestellt. Selbstverständlich werden die Daten unter Beachtung der geltenden datenschutzrechtlichen Bestimmungen vertraulich behandelt. Die statistisch aufbereiteten und aggregierten Auswertungen werden zur Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse veröffentlicht. Die Verwendung des gesamten Datenmaterials erfolgt ausschließlich für wissenschaftliche Zwecke im Zusammenhang mit der Studie „Potentiale von Augmented Reality (AR) basierten Lernumgebungen“ und die Rückmeldung an die Teilnehmenden.

Kaiserslautern, 15.01.2019

Carsten Hoffmann

2.1.3 Anschreiben Kooperationsangebot (App-Entwicklung)

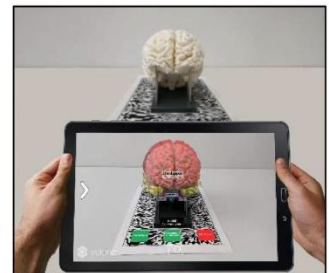
Sehr geehrte Lehrkräfte der Fächer Biologie und Erdkunde,

digitale Medien sind aktuell im Fokus der Bildungsdiskussion. Es bieten sich sicher viele Potenziale, aber nicht alles, was technisch machbar ist, muss auch sinnvoll sein. Ich erforsche deshalb im Rahmen meiner Doktorarbeit die „**Potentiale von Augmented Reality (AR) basierten Lernumgebungen**“ aus Lehrer- und Schülerperspektive. Die AG Fachdidaktik der Biologie der TU Kaiserslautern macht Schulen über das laufende Projekt ein attraktives

Gebäude 14/224
Erwin-Schrödinger Str.
67663 Kaiserslautern
Telefon: (0631) 205 3652
Telefax: (0631) 205 123652
E-Mail: thyssen@rhrk.uni-kl.de
<http://www.fdbio-tukl.de>

Kooperationsangebot.

Beschreibung: AR ermöglicht es die Realität mithilfe von Smartphones oder Tablet-PCs durch virtuelle Komponenten zu erweitern (= augmentieren). Dabei werden virtuelle Overlays positionsgenau auf real vorhandene Medien im Kamerabild eingeblendet. So können beispielsweise Modelle o.ä. mittels zusätzlicher Informationen wie Beschriftungen, 3D-Daten, Beschreibungen, Audiodateien etc. erweitert werden, ohne dass die Realität verändert wird. Weiterhin können virtuelle Hilfestellungen auf einem Arbeitsblatt nach individuellem Bedarf eingeblendet werden. Dies ermöglicht, besonders unter dem Gesichtspunkt der Binnendifferenzierung, zahlreiche Anwendungsfelder im Unterricht.



AR am Beispiel des Alzheimerkoffers
(www.alzheimerkoffer.de).

Was wir Ihnen bieten:

- Gestaltung und Konzeption einer AR-basierten Lernumgebung nach Ihren Lernzielen
- Nutzung bereits vorhandener Unterrichtskonzepte (u.a. Neuroanatomie, Alzheimerdemenz, Farbenblindheit, Zellanatomie (tierisch/pflanzlich))
- Nutzung von 20 Tablet-PCs
- Durchführung bei Ihnen vor Ort oder an der TU Kaiserslautern
- Betreuung vor, während und nach der Unterrichtseinheit durch mich oder einen Mitarbeiter der Fachdidaktik Biologie
- gerne auch die komplette Führung der Unterrichtseinheit
- wiederverwendbares Unterrichtsmaterial für die Zukunft

Was von Ihrer Seite benötigt wird:

- Zustimmung zur Erhebung von anonymen Forschungsdaten
- Bereitschaft mit KollegInnen zusammenzuarbeiten, sodass das Unterrichtsmaterial mehreren Klassen zur Verfügung steht
- vorausschauende Unterrichtsplanung, um die Konzepte didaktisch-methodisch umzusetzen

Wenn ich Ihr Interesse wecken konnte, freue ich mich über Ihre Rückmeldung und eine baldige Kooperation. Für eventuelle Rückfragen stehe ich Ihnen gerne zur Verfügung.

Mögliche Zeitfenster für unsere Zusammenarbeit:

KW 3	14.01. - 18.01.2019	KW 12	18.03. – 22.03.2019
KW 5	28.01. - 01.02.2019	KW 15	08.04. – 12.04.2019
KW 7	11.02. – 15.02.2019	KW 19	06.05. – 10.05.2019

Mit freundlichen Grüßen,

Carsten Hoffmann

 hoffmann@biologie.uni-kl.de

 +49 631 205 4011

2.1.4 Anschreiben Hauptstudien

AUGMENTED REALITY im Biologieunterricht

Sehr geehrte Lehrkräfte,

seit den Beschlüssen der KMK „Bildung in der digitalen Welt“ (2016) sind digitale Medien ein bedeutsamer Teil der Bildungsdiskussion. Digitale Medien eröffnen viele Möglichkeiten im Unterricht, aber nicht alles, was technisch machbar ist, muss auch sinnvoll sein. Ich erforsche deshalb im Rahmen meiner Doktorarbeit die „**Potentiale von Augmented Reality (AR) basierten Lernumgebungen**“ aus Schülerperspektive. Die AG Fachdidaktik der Biologie der TU Kaiserslautern macht Schulen über das laufende Projekt ein unterstützendes

Angebot.

Beschreibung: AR ermöglicht es die Realität mithilfe von Smartphones oder Tablets durch virtuelle Komponenten zu erweitern (= augmentieren). Dabei werden virtuelle Overlays positionsgenau auf real vorhandene Medien im Kamerabild eingeblendet. In den Unterrichtseinheiten werden Modelle und Abbildungen mittels zusätzlicher Informationen wie Beschriftungen, 3D-Daten, Beschreibungen und Audiodateien erweitert, ohne dass die Realität verändert wird. Dies ermöglicht zahlreiche Anwendungsfelder im Unterricht.

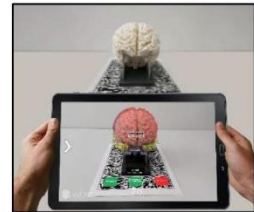


Abb. 1: AR am Beispiel des Alzheimerkoffers
(<http://www.alzheimerkoffer.de/>).

Wir bieten Ihnen

- die Durchführung von erprobten Unterrichtseinheiten zu den Themen:
 - [Aufbau des Gehirns \(90 min, Sek. II\)](#)
 - [Pathologie der Alzheimerkrankheit \(Folgestunde, 90 min, Sek. II\)](#)
 - [Aufbau von Mitochondrien und Chloroplasten \(90 min, Sek. I\)](#)
 - [Mitose und Meiose \(2 x 90 min, Sek. II\)](#)

bei Ihnen vor Ort oder an der TU Kaiserslautern durch einen Mitarbeiter der FD Biologie.

- die einzigartige Gelegenheit Augmented Reality im Unterricht zu erleben.
- die Bereitstellung von Unterrichtsmaterial (inkl. 20 Tablets) durch die AG Fachdidaktik Biologie.
- die Stärkung des MINT-Profiles Ihrer Schule.

Von Ihnen benötigen wir lediglich

- die Zustimmung zur Erhebung von Forschungsdaten.
- Ihre Terminwünsche zur Durchführung der Unterrichtsstunde.

Wenn ich Ihr Interesse wecken konnte, freue ich mich über Ihre Rückmeldung und eine baldige Zusammenarbeit. Für eventuelle Rückfragen stehe ich Ihnen gerne zur Verfügung.

Mögliche Zeitfenster im Schuljahr 2019/20 für unsere Zusammenarbeit:

	September			Oktober				November				Dezember				Januar				Februar			März				April								
KW	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Aufbau des Gehirns (Kl. 6 / Sek. II)																																			
Pathologie der Alzheimerdemenz (Folgestunde zum Hirnaufbau) (Kl. 6 / Sek. II)																																			
Aufbau Mitochondrien & Chloroplasten (Sek. I)																																			
Mitose und Meiose (Sek. II)																																			

Mit freundlichen Grüßen,

Carsten Hoffmann

M.Ed. Carsten Hoffmann
TU Kaiserslautern
AG Fachdidaktik Biologie

mail: fdbio@biologie.uni-kl.de
Tel.: +49 631 205-4011
Leitung: apl. Prof. Dr. Thyssen

Kalender:
tinyurl.com/y6hdmroo
oder QR-Code



2.1.5 Befragung nach LS (exemplarisch)

Aufgabe 2: äußerer Aufbau Gehirn

In dieser Umfrage sind 7 Fragen enthalten.

Gruppe *

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- A
 B

Kennung *

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Bitte nehme dir die Zeit die Fragen aufmerksam zu lesen und markieren deine Antwort in der entsprechenden Spalte.

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	trifft gar nicht zu 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	trifft voll zu 10
Die in der Aufgabe behandelten Zusammenhänge und Begriffe empfand ich als schwierig.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Thema der Aufgabe an sich war sehr komplex.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Inhalte der Aufgabe waren sehr kompliziert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Aufgabenstellungen, Materialien und Informationen waren sprachlich sehr unklar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Aufgabenstellungen, Materialien und Informationen waren schwer zu verstehen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die verwendeten Aufgabenstellungen, Materialien und Informationen waren für das Lernen sehr nutzlos.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

	trifft gar nicht zu 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	trifft voll zu 10
Die Informationen in der App/in den Materialien waren sehr verwirrend dargestellt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Aufgabe verbessert mein Wissen über den äußeren Aufbau des Gehirns.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Aufgabe verbessert mein Verständnis der Biologie.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Aufgabe verbessert mein Verständnis der behandelten Themen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Aufgabe verbessert mein Verständnis über den äußeren Aufbau des Gehirns.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

In der gerade beendeten Aufgabe investierte ich ...

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- sehr, sehr wenige geistige Anstrengung
- sehr wenige geistige Anstrengung
- wenig geistige Anstrengung
- eher niedrig geistige Anstrengung
- weder wenig noch hohe geistige Anstrengung
- eher hohe geistige Anstrengung
- hohe geistige Anstrengung
- sehr hohe geistige Anstrengung
- sehr, sehr hohe geistige Anstrengung

Die gerade beendete Aufgabe war ...

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- sehr, sehr einfach
- sehr einfach
- einfach
- eher einfach
- weder einfach noch schwierig
- eher schwierig
- schwierig
- sehr schwierig
- sehr, sehr schwierig

Wie sehr warst du während der Aufgabe konzentriert?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- sehr, sehr wenig
- sehr wenig
- wenig
- eher wenig
- weder wenig noch viel
- eher viel
- viel
- sehr viel
- sehr, sehr viel

Von der Aufgabe etwas zu lernen war ...

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- sehr, sehr einfach
- sehr einfach
- einfach
- eher einfach
- weder einfach noch schwierig
- eher schwierig
- schwierig
- sehr schwierig
- sehr, sehr schwierig

Vielen Dank für die Beantwortung des Fragebogens.

2.1.6 Abschlussbefragung (exemplarisch)

Abschlussbefragung (Alzheimer)

Erfassung von Schüler/Lehrermeinungen zum Einsatz von Augmented Reality im Unterricht

Deine Meinung zählt!

Im Rahmen meines Forschungsvorhabens erhalten Sie verschiedene Fragen zum Thema **Augmented Reality** und **Schule**.

Alle Angaben sind freiwillig und werden **anonym** behandelt. Sie werden allein zu diesem Forschungszweck verwendet und nicht weitergegeben.

In dieser Umfrage sind 16 Fragen enthalten.

Bitte gebe deine Kennung ein (KEIN NAME!) *

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Geschlecht

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- weiblich
- männlich
- divers

Meine letzte Zeugnisnote im Fach Biologie:

🗳️ Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- sehr gut
- gut
- befriedigend
- ausreichend
- mangelhaft
- ungenügend

Alter

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Geben Sie bitte Ihre Vorerfahrungen zu Augmented Reality an

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	ja	nein
Ich hatte vorher schon von Augmented Reality gehört:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich hatte vorher schon Augmented Reality eingesetzt:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Falls ja, wo?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Schule
- Privat

Mehrfachnennung möglich!

Markiere die zutreffende Spalte.

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	trifft gar nicht zu 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	trifft voll zu 10
Die in der Lehreinheit behandelten Zusammenhänge und Begriffe empfand ich als schwierig.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Lehreinheit verbesserte mein Wissen über das Gehirn.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Lehreinheit verbesserte mein Wissen über die Alzheimerdemenz.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Thema der Lehreinheit an sich war sehr komplex.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Lehreinheit verbesserte mein biologisches Verständnis.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die in der Lehreinheit behandelten Inhalte empfand ich als sehr kompliziert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Lehreinheit verbesserte mein Verständnis der behandelten Themen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Lehreinheit verbesserte mein Verständnis über das Gehirn.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Lehreinheit verbesserte mein Verständnis über die Alzheimerdemenz.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

In der gerade beendeten Lehreinheit investierte ich ...

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- sehr, sehr wenige geistige Anstrengung
- sehr wenige geistige Anstrengung
- wenig geistige Anstrengung
- eher niedrig geistige Anstrengung
- weder wenig noch hohe geistige Anstrengung
- eher hohe geistige Anstrengung
- hohe geistige Anstrengung
- sehr hohe geistige Anstrengung
- sehr, sehr hohe geistige Anstrengung

Die gerade beendete Lehreinheit war ...

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- sehr, sehr einfach
- sehr einfach
- einfach
- eher einfach
- weder einfach noch schwierig
- eher schwierig
- schwierig
- sehr schwierig
- sehr, sehr schwierig

Wie sehr warst du während der Lehreinheit konzentriert?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- sehr, sehr wenig
- sehr wenig
- wenig
- eher wenig
- weder wenig noch viel
- eher viel
- viel
- sehr viel
- sehr, sehr viel

Von der Lehreinheit etwas zu lernen war ...

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- sehr, sehr einfach
- sehr einfach
- einfach
- eher einfach
- weder einfach noch schwierig
- eher schwierig
- schwierig
- sehr schwierig
- sehr, sehr schwierig

Bewerten Sie Augmented Reality in Bezug auf das Lernen.

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	trifft gar nicht zu 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	trifft voll zu 10
Ich lerne lieber mit Augmented Reality.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mit analogen/klassischen Medien lerne ich besser.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich war mit analogen/klassischen Medien konzentriert bei der Arbeit.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Augmented Reality ermuntert mich zum Lernen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich lerne lieber mit analogen/klassischen Medien (Internet, Arbeitsblatt, Modell etc.).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Analoge/klassische Medien ermuntern mich zum Lernen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mit der Augmented konnte ich die Inhalte schneller lernen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Augmented Reality fördert meine Medienkompetenz.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mit Augmented Reality lerne ich besser.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mit analogen/klassischen Medien konnte ich die Inhalte schneller Lernen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Analoge/klassische Medien fördern meine Medienkompetenz.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich war mit Augmented Reality konzentriert bei der Arbeit.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Bitte geben Sie nun Ihre Einschätzung zu der App ab.

Entscheiden Sie möglichst spontan. Es ist wichtig, dass Sie **nicht lange über die Begriffe nachdenken**, damit Ihre unmittelbare Einschätzung zum Tragen kommt.

Bitte kreuzen Sie immer eine Antwort an, auch wenn Sie bei der Einschätzung zu einem Begriffspaar unsicher sind oder finden, dass es nicht so gut zu der App passt.

Es gibt keine „richtige“ oder „falsche“ Antwort. Ihre persönliche Meinung zählt! *

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	1	2	3	4	5	6	7	
unerfreulich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	erfreulich
unverständlich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	verständlich
kreativ	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	phantasielos
leicht zu lernen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	schwierig lernen
wertvoll	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	minderwertig
langweilig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	spannend
uninteressant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	interessant
unberechenbar	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	voraussagbar
schnell	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	langsam
originell	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	konventionell
behindernd	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	unterstützend
gut	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	schlecht
kompliziert	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	einfach
abstoßend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	anziehend
herkömmlich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	neuartig
unangenehm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	angenehm

Anhang

	1	2	3	4	5	6	7	
sicher	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	unsicher
aktivierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	einschläfernd
erwartungskonform	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	nicht erwartungskonform
ineffizient	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	effizient
übersichtlich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	verwirrend
unpragmatisch	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	pragmatisch
aufgeräumt	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	überladen
attraktiv	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	unattraktiv
sympathisch	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	unsympathisch
konservativ	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	innovativ

Markiere die zutreffende Spalte.

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	trifft gar nicht zu 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	trifft voll zu 10
Der Umgang mit der App ist einfach.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die App ist selbsterklärend.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Funktionen finde ich hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Menüführung und Auswahlmöglichkeiten helfen mir mich zurechtzufinden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Markiere die zutreffende Spalte.

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	trifft gar nicht zu 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	trifft voll zu 10
Lehrkräfte sollten öfter Augmented Reality im Unterricht einsetzen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Es sollte mehr in die technische Infrastruktur (WLAN, Tablets etc.) von Schulen investiert werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Augmented Reality ist ein komplexes Medium.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Augmented Reality überfordert mich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Dinge die bei der App verbessert werden sollten

🗨️ Kommentieren wenn eine Antwort gewählt wird

Bitte wählen Sie die zutreffenden Punkte aus und schreiben Sie einen Kommentar dazu:

<input type="checkbox"/> Darstellung	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Bedienung	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Eingabemöglichkeiten	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Benutzerfreundlichkeit	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Stabilität	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> sonstiges	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> keine Verbesserung notwendig	<input type="text"/>

Vielen Dank für Deine Teilnahme!

Ich möchte mich ganz herzlich für Deine Mithilfe bedanken.

Falls Sie Interesse haben Augmented Reality in Ihrem Unterricht einzusetzen, würde ich mich freuen, Sie bei Ihrem Vorhaben zu unterstützen!

Carsten Hoffmann (mailto:hoffmann@biologie.uni-kl.de)

Übermittlung Ihres ausgefüllten Fragebogens:

Vielen Dank für die Beantwortung des Fragebogens.

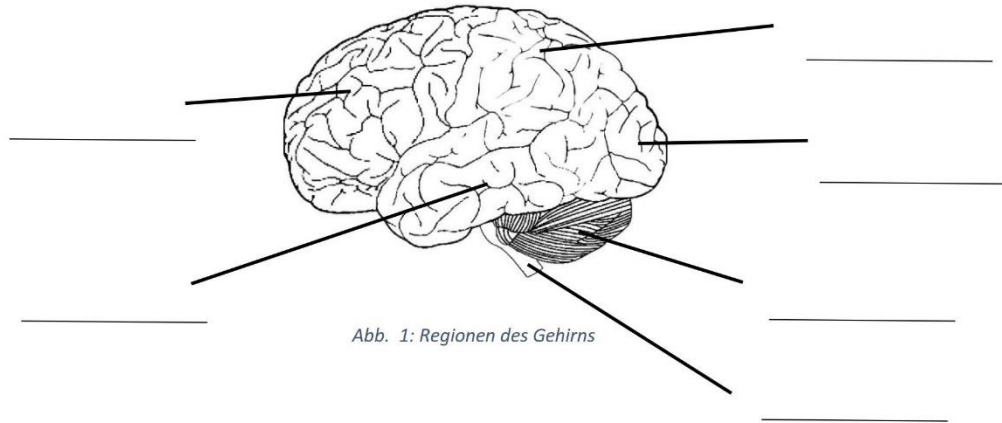
2.2 Studie Alzheimerkoffer

2.2.1 Pre- und Posttest (Paper-Pencil)

Gruppe: _____

Kennung: _____

1. **Benenne** die Regionen des Gehirns in Abb. 1 und **zeichne** ihre Grenzen nach!



2. Woran lassen sich die Grenzen der Großhirnregionen erkennen?

3. **Abbildung 2** stellt einen Schnitt des Gehirns dar. **Zeichne die optische Schnittebene des Schnittes in beide Abbildungen. 3 & 4 ein!**



Abb. 2: Hirnschnitt (Modell)

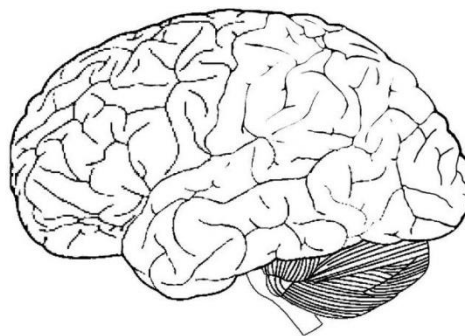


Abb. 3: Zeichne die passende optische Schnittebene ein!

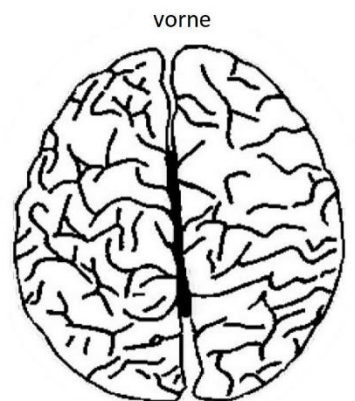


Abb. 4: Zeichne die passende optische Schnittebene ein!

4. **Benenne** die aufgezeigten Strukturen in Abb. 5!

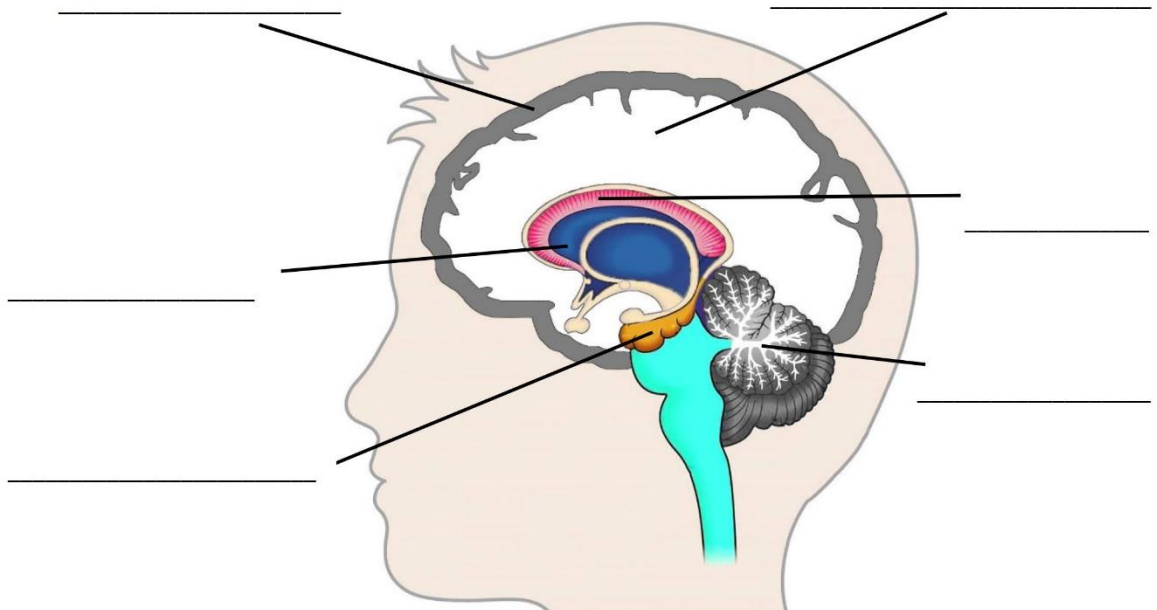


Abb. 5: Der innere Aufbau des Gehirns

5. Dargestellt in Abb. 6 ist ein MRT-Bild eines gesunden Menschen.

a) Beschrifte die graue und weiße Substanz!

b) Zeichne folgende Regionen ein und beschrifte:

Ventrikel, Hippocampus, Stirnlappenbereich, Schläfenlappenbereich

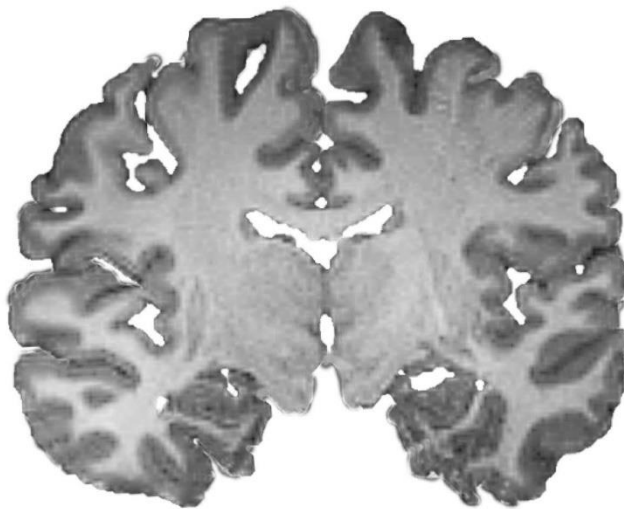
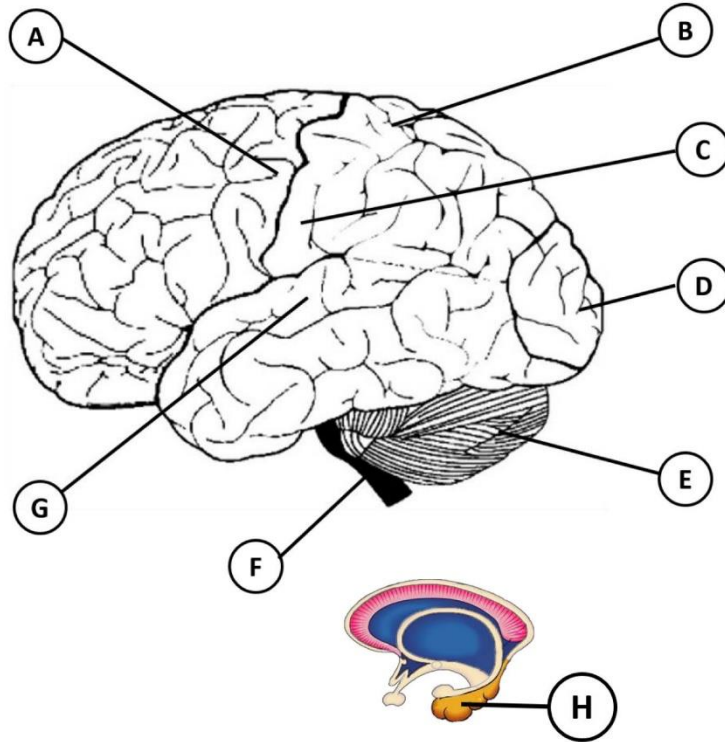


Abb. 6: MRT-Bild einer gesunden Person

Kognitiver Wissenstest
Pre-Test

6. Ordne den Gehirnregionen dir korrekte Funktion zu!



- Atmung & Herzschlag
- Sehen
- Speicherung von Kurzzeitgedächtnis zu Langzeitgedächtnis
- Gleichgewicht aufrechter Gang
- Hören
- Bewegung = prozedurales Wissen
- Tasten
- Räumliches Denken



Kognitiver Wissenstest
Pre-Test



7. Nenne ein Merkmal, woran sich ein von Alzheimer betroffenes Gehirn zu einem gesunden Gehirn bei äußerer Betrachtung unterscheidet!

8. Beschreibe stichwortartig die von Alzheimer hervorgerufenen Veränderungen auf folgende Regionen:

Schläfenlappen: _____

Stirnloben: _____

Großhirnrinde (graue Substanz): _____

Mark (weiße Substanz): _____

Ventrikel: _____

Hippocampus: _____

9. Beschreibe die strukturellen Veränderungen zwischen den einzelnen Phasen der Alzheimerdemenz und gebe sie in der Spalte „Pathologie des Gehirns“ in der Tabelle an!

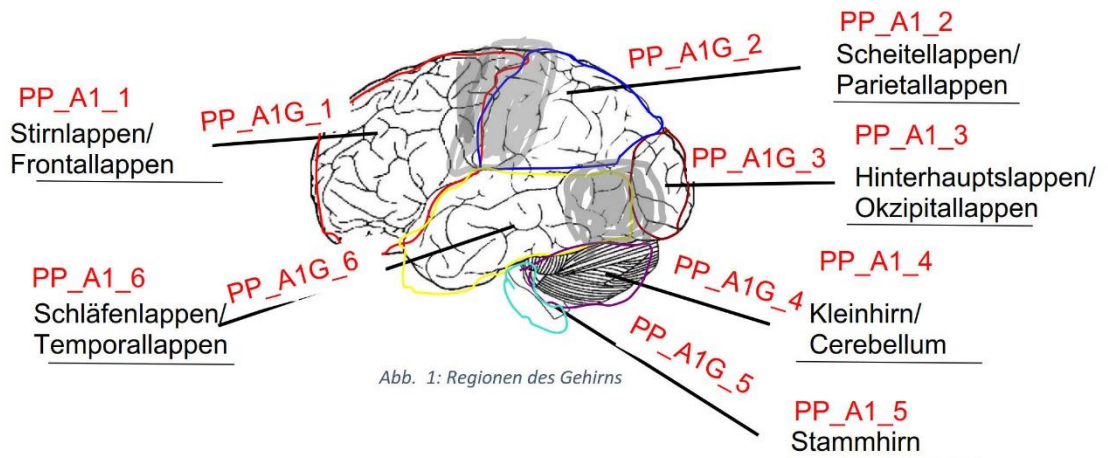
Krankheitsstadium	Pathologie des Gehirns
<p>gesund</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>frühe Demenzphase (Phase 1)</p>	
<p>frühe Demenzphase (Phase 1)</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>mittlere Demenzphase (Phase 2)</p>	
<p>mittlere Demenzphase (Phase 2)</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>späte Demenzphase (Phase 3)</p>	

2.2.2 Auswertungsmatrix mit Variablenbezeichnung

Gruppe: _____

Kennung: _____

1. Benenne die Regionen des Gehirns in Abb. 1 und zeichne ihre Grenzen nach!



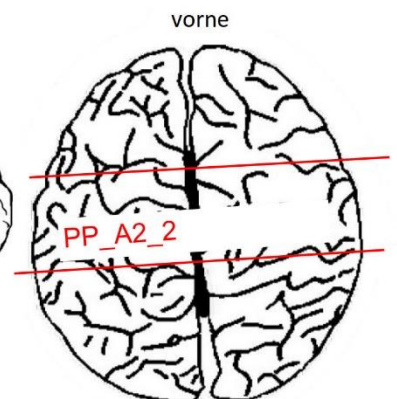
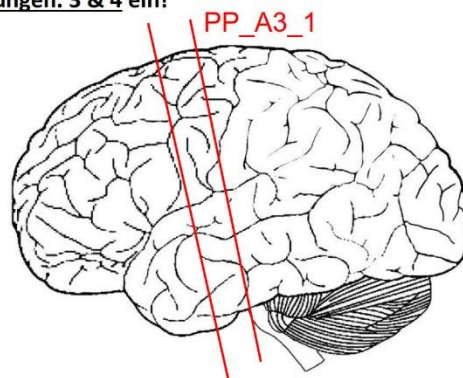
2. Woran lassen sich die Grenzen der Großhirnregionen erkennen?

markante/tiefe/breite Hirnfurchen/Falten o.ä.

PP_A2_1

PP_A2_2

3. Abbildung 2 stellt einen Schnitt des Gehirns dar. Zeichne die optische Schnittebene des Schnittes in beide Abbildungen. 3 & 4 ein!



4. Benenne die aufgezeigten Strukturen in Abb. 5!

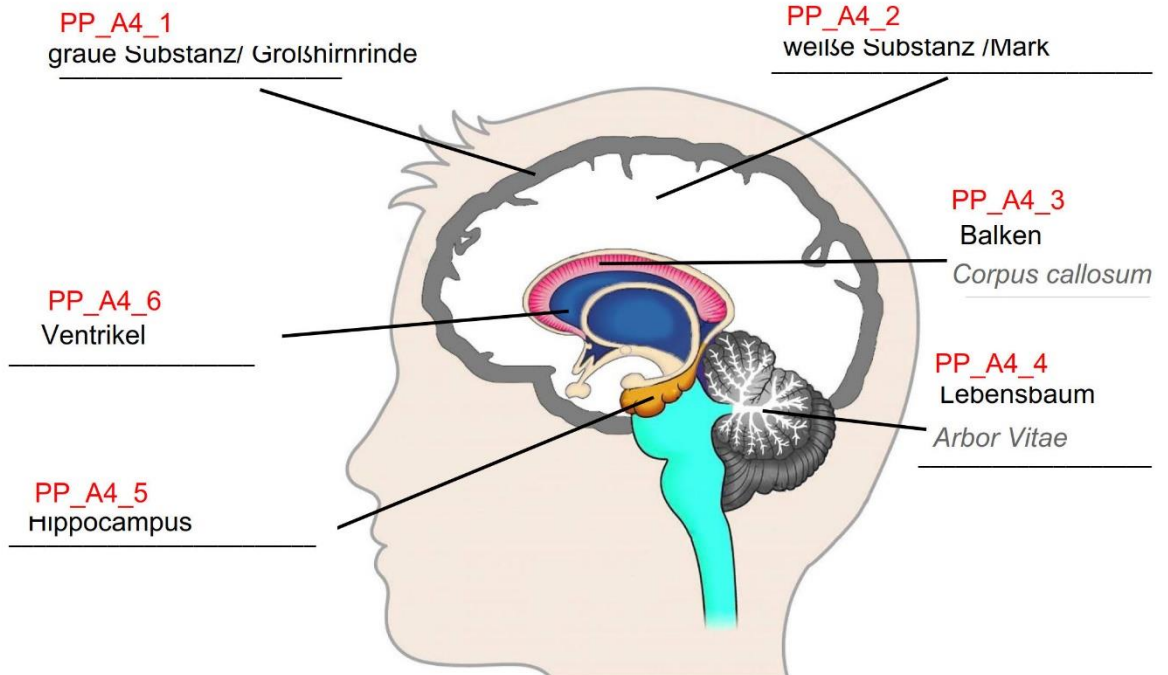


Abb. 5: Der innere Aufbau des Gehirns

5. Dargestellt in Abb. 6 ist ein MRT-Bild eines gesunden Menschen.

a) Beschrifte die graue und weiße Substanz!

b) Zeichne folgende Regionen ein und beschrifte: PP_A5_X
Ventrikel, Hippocampus, Frontallappenbereich, Temporallappenbereich

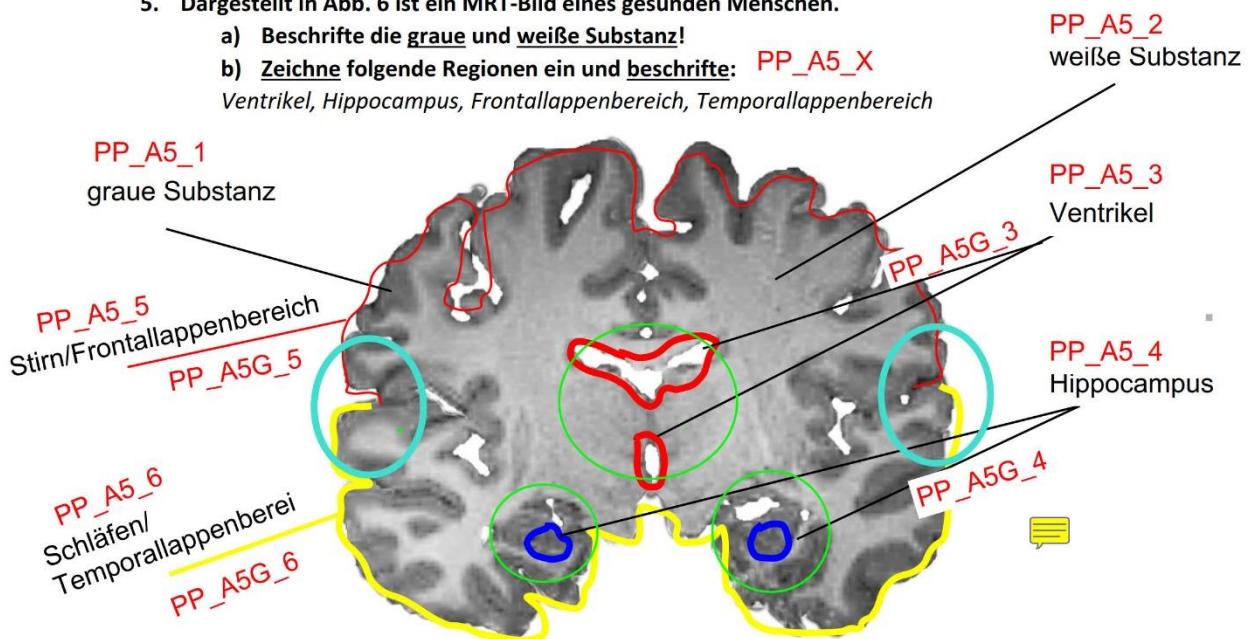


Abb. 6: MRT-Bild einer gesunden Person

6. Ordne den Gehirnregionen dir korrekte Funktion zu!

The diagram shows a lateral view of the human brain with labels A through G pointing to different regions. A smaller diagram of the cerebellum is shown below with label H pointing to it.

- A: Frontal lobe
- B: Parietal lobe
- C: Temporal lobe
- D: Occipital lobe
- E: Brainstem
- F: Cerebellum
- G: Auditory cortex
- H: Cerebellum

Legend:

- PP_A6_1 (F) Atmung & Herzschlag
- PP_A6_2 (D) Sehen
- PP_A6_3 (H) Speicherung von Kurzzeitgedächtnis zu Langzeitgedächtnis
- PP_A6_4 (E) Gleichgewicht aufrechter Gang
- PP_A6_5 (G) Hören
- PP_A6_6 (A) Bewegung = prozedurales Wissen
- PP_A6_7 (C) Tasten
- PP_A6_8 (B) Räumliches Denken



Kognitiver Wissenstest
Post-Test



7. Nenne ein Merkmal, woran sich ein von Alzheimer betroffenes Gehirn zu einem gesunden Gehirn bei äußerer Betrachtung unterscheidet!

verbreiterte/tiefere Hirnfurchen

PP_A7_1

PP_A7_2

8. Beschreibe stichwortartig die von Alzheimer hervorgerufenen Veränderungen auf folgende Regionen:

PP_A8_1 Temporallappen: graue Substanz nimmt ab/ Furchung wird tiefer/wird weniger

PP_A8_2 Frontallappen: graue Substanz nimmt ab/ Furchung wird tiefer/wird weniger

PP_A8_3 Cortex (graue Substanz): graue Substanz nimmt ab/ Furchung wird tiefer/wird weniger

PP_A8_4 Mark (weiße Substanz): bleibt gleich/verändert sich kaum

PP_A8_5 Ventrikel: vergrößern sich

PP_A8_6 Hippocampus: verschwindet fast vollständig/wird kleiner

9. Beschreibe die strukturellen Veränderungen zwischen den einzelnen Phasen der Alzheimerdemenz und gebe sie in der Spalte „Pathologie des Gehirns“ in der Tabelle an!

Krankheitsstadium	Pathologie des Gehirns
<p>gesund</p> <p>↓</p> <p>frühe Demenzphase (Phase 1)</p>	<p>Hippocampus wird kleiner PP_A9_1</p>
<p>frühe Demenzphase (Phase 1)</p> <p>↓</p> <p>mittlere Demenzphase (Phase 2)</p>	<p>Hippocampus reduziert sich weiter PP_A9_2 Ventrikel vergrößern sich graue Substanz nimmt entlang der Hirnrinde ab PP_A9_3</p> <p>PP_A9_4</p>
<p>mittlere Demenzphase (Phase 2)</p> <p>↓</p> <p>späte Demenzphase (Phase 3)</p>	<p>Hippocampus (fast) vollständig verschwunden PP_A9_5 Ventrikel vergrößern sich PP_A9_6 kaum noch graue Substanz vorhanden PP_A9_7</p>

2.3 Studie Mitochondrien und Chloroplasten

2.3.1 Pre- und Posttest (LimeSurvey)

Gruppe: _____

Kennung: _ _ _ _

1. Die ATP-Synthase befindet sich bei Chloroplasten ...

- in der Innenmembran
- in der Thylakoidmembran
- im Ribosom
- in der Stromamembran
- weiß nicht

2. Wie wird der Raum bei Chloroplasten und Mitochondrien bezeichnet der sich zwischen zwei Zellmembranen befindet?

- _____ Intermembranraum
- weiß nicht

3. Cristae sind ...

- Einstülpungen der Thylakoidmembran bei Mitochondrien.
- Einstülpungen der Innenmembran bei Chloroplasten.
- Einstülpungen der Innenmembran bei Mitochondrien.
- Einstülpungen der Thylakoidmembran bei Chloroplasten.
- weiß nicht

4. Was trifft zu?

- Mitochondrien besitzen eigene Erbinformationen in Chromosomenform
- Chloroplasten besitzen Erbinformationen
- Mitochondrien besitzen eigene ringförmige Erbinformationen
- Chloroplasten besitzen Erbinformationen in Chromosomenform
- weiß nicht

5. Mitochondrien sind die „Kraftwerke der Zelle“. Welche Zellbestandteile sind zentral bei der Energieumsetzung beteiligt?

- ADP-Synthasen
- ADP-asen
- ATP-Synthasen
- Stärke
- 70S-Ribosomen
- weiß nicht

6. Das Stroma befindet sich in

- Chloroplasten
- Mitochondrien
- Keine von beiden
- weiß nicht

7. Ribosomen befinden sich in Mitochondrien ...

- im Intermembranraum
- im Stroma
- in der Matrix
- inneren Zellmembran
- im Granum
- weiß nicht

8. Ribosomen befinden sich in Chloroplasten ...

- im Intermembranraum
- im Stroma
- in der Matrix
- inneren Zellmembran
- im Granum
- weiß nicht

9. Welche Zellbestandteile sind in Mitochondrien im gleichen Kompartiment (Raum) zu finden?

- DNA, Ribosomen und Stärke
- Cristae, DNA und Ribosomen
- Keines der oberen
- weiß nicht

10. DNA, Stärke und Ribosomen befinden sich im Chloroplasten

- In der Matrix
- Im Stroma
- Im Thylakoidlumen
- Intermembranraum
- Keines der oberen
- weiß nicht

11. Wie viele Zellmembranen besitzen Mitochondrien

- 2
- 3
- 4
- Variabel, maximal 7
- weiß nicht

12. Wie viele Zellmembranen besitzen Chloroplasten

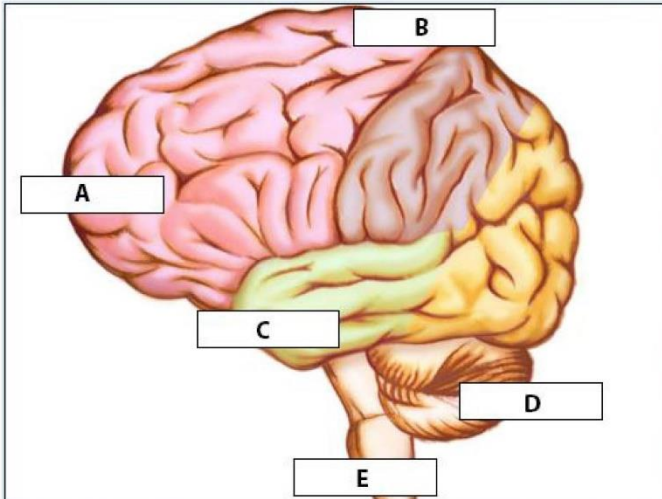
- 2
- 3
- 4
- Variabel, maximal 7
- weiß nicht

2.4 Studie HoloBrain

2.4.1 Pre- und Posttest (OLAT)

Pre- und Post-Test zur HoloBrain-App

A1) Beschriften Sie die Abbildung durch Zuordnen der korrekten Begriffe!



D

A

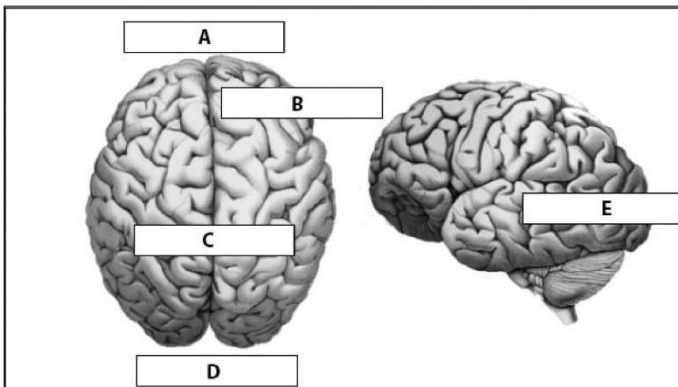
B

C

E

- Parietallappen
- Frontallappen
- Cerebellum
- Stammhirn
- Temporallappen

A2) Beschriften Sie die Abbildung durch Zuordnen der korrekten Begriffe!



C

A

B

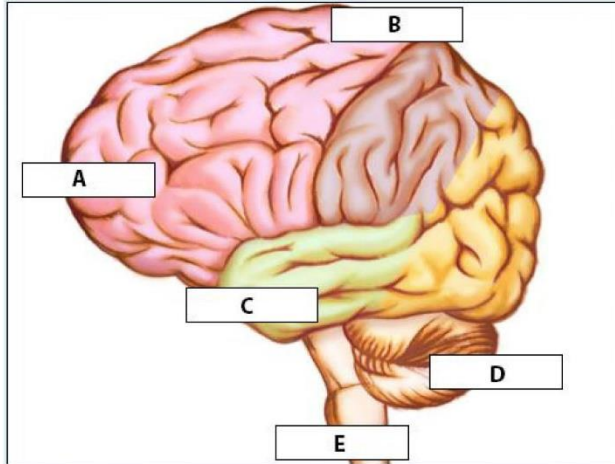
D

E

- Okzipitallappen
- hinten
- rechte Hemisphäre
- vorne
- Zentralfurche

Pre- und Post-Test zur HoloBrain-App (Musterlösung)

A1) Beschriften Sie die Abbildung durch Zuordnen der korrekten Begriffe!



D
Cerebellum

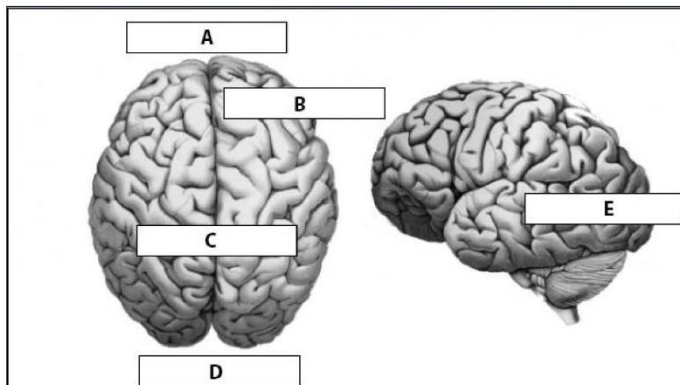
A
Frontallappen

E
Stammhirn

C
Temporallappen

B
Parietallappen

A2) Beschriften Sie die Abbildung durch Zuordnen der korrekten Begriffe!



B
rechte Hemisphäre

C
Zentralfurche

D
hinten

A
vorne

E
Okzipitallappen

3 Tabellarische Ergebnisse

3.1 Analyse der Testinstrumente

3.1.1 Hauptkomponentenanalyse: CLT

		Korrelationsmatrix										
		MEAN_IL1	MEAN_IL2	MEAN_IL3	MEAN_EL1	MEAN_EL2	MEAN_EL3	MEAN_EL4	MEAN_GL1	MEAN_GL2	MEAN_GL3	MEAN_GL4
Korrelation	MEAN_IL1	1,000	0,697	0,827	0,693	0,813	0,534	0,691	-0,307	-0,121	-0,263	-0,319
	MEAN_IL2	0,697	1,000	0,704	0,516	0,612	0,353	0,457	-0,177	-0,040	-0,137	-0,181
	MEAN_IL3	0,827	0,704	1,000	0,705	0,798	0,525	0,696	-0,317	-0,093	-0,237	-0,305
	MEAN_EL1	0,693	0,516	0,705	1,000	0,762	0,565	0,760	-0,376	-0,198	-0,340	-0,414
	MEAN_EL2	0,813	0,612	0,798	0,762	1,000	0,603	0,770	-0,394	-0,195	-0,354	-0,434
	MEAN_EL3	0,534	0,353	0,525	0,565	0,603	1,000	0,632	-0,527	-0,380	-0,489	-0,536
	MEAN_EL4	0,691	0,457	0,696	0,760	0,770	0,632	1,000	-0,428	-0,248	-0,387	-0,449
	MEAN_GL1	-0,307	-0,177	-0,317	-0,376	-0,394	-0,527	-0,428	1,000	0,645	0,843	0,903
	MEAN_GL2	-0,121	-0,040	-0,093	-0,198	-0,195	-0,380	-0,248	0,645	1,000	0,785	0,656
	MEAN_GL3	-0,263	-0,137	-0,237	-0,340	-0,354	-0,489	-0,387	0,843	0,785	1,000	0,828
	MEAN_GL4	-0,319	-0,181	-0,305	-0,414	-0,434	-0,536	-0,449	0,903	0,656	0,828	1,000

KMO- und Bartlett-Test		
Maß der Stichprobeneignung		0,898
Bartlett-Test auf Sphärizität	Ungefährtes Chi-Quadrat	3994,582
	df	55
	Signifikanz nach Bartlett	0,000

		Anti-Image-Matrizen											
		MEAN_IL1	MEAN_IL2	MEAN_IL3	MEAN_EL1	MEAN_EL2	MEAN_EL3	MEAN_EL4	MEAN_GL1	MEAN_GL2	MEAN_GL3	MEAN_GL4	
Anti-Image-Kovarianz	MEAN_IL1	0,228	-0,088	-0,077	-0,012	-0,068	-0,018	-0,022	-0,004	-0,007	0,007	-0,004	
	MEAN_IL2	-0,088	0,447	-0,098	-0,012	-0,019	0,012	0,052	-0,006	0,005	0,000	-0,001	
	MEAN_IL3	-0,077	-0,098	0,224	-0,035	-0,048	-0,011	-0,032	0,030	-0,012	-0,014	-0,022	
	MEAN_EL1	-0,012	-0,012	-0,035	0,328	-0,053	-0,020	-0,107	-0,014	-0,008	0,005	0,021	
	MEAN_EL2	-0,068	-0,019	-0,048	-0,053	0,210	-0,031	-0,059	-0,018	-0,014	0,009	0,027	
	MEAN_EL3	-0,018	0,012	-0,011	-0,020	-0,031	0,484	-0,078	0,022	0,037	0,002	0,013	
	MEAN_EL4	-0,022	0,052	-0,032	-0,107	-0,059	-0,078	0,297	0,005	0,004	0,003	0,000	
	MEAN_GL1	-0,004	-0,006	0,030	-0,014	-0,018	0,022	0,005	0,148	0,019	-0,061	-0,101	
	MEAN_GL2	-0,007	0,005	-0,012	-0,008	-0,014	0,037	0,004	0,019	0,368	-0,143	-0,020	
	MEAN_GL3	0,007	0,000	-0,014	0,005	0,009	0,002	0,003	-0,061	-0,143	0,180	-0,028	
	MEAN_GL4	-0,004	-0,001	-0,022	0,021	0,027	0,013	0,000	-0,101	-0,020	-0,028	0,156	
	Anti-Image-Korrelation	MEAN_IL1	,917 ^a	-0,276	-0,339	-0,043	-0,310	-0,056	-0,084	-0,024	-0,023	0,035	-0,020
		MEAN_IL2	-0,276	,911 ^a	-0,310	-0,031	-0,061	0,027	0,144	-0,024	0,012	-0,002	-0,003
MEAN_IL3		-0,339	-0,310	,907 ^a	-0,127	-0,223	-0,034	-0,125	0,165	-0,043	-0,070	-0,120	
MEAN_EL1		-0,043	-0,031	-0,127	,943 ^a	-0,203	-0,051	-0,343	-0,065	-0,024	0,019	0,091	
MEAN_EL2		-0,310	-0,061	-0,223	-0,203	,927 ^a	-0,096	-0,236	-0,104	-0,052	0,045	0,150	
MEAN_EL3		-0,056	0,027	-0,034	-0,051	-0,096	,973 ^a	-0,207	0,081	0,088	0,008	0,047	
MEAN_EL4		-0,084	0,144	-0,125	-0,343	-0,236	-0,207	,927 ^a	0,025	0,012	0,015	-0,002	
MEAN_GL1		-0,024	-0,024	0,165	-0,065	-0,104	0,081	0,025	,820 ^a	0,080	-0,373	-0,667	
MEAN_GL2		-0,023	0,012	-0,043	-0,024	-0,052	0,088	0,012	0,080	,841 ^a	-0,555	-0,085	
MEAN_GL3		0,035	-0,002	-0,070	0,019	0,045	0,008	0,015	-0,373	-0,555	,852 ^a	-0,166	
MEAN_GL4		-0,020	-0,003	-0,120	0,091	0,150	0,047	-0,002	-0,667	-0,085	-0,166	,851 ^a	

a. Maß der Stichprobeneignung

Kommunalitäten		
	Anfänglich	Extraktion
MEAN_IL1	1,000	0,846
MEAN_IL2	1,000	0,892
MEAN_IL3	1,000	0,851
MEAN_EL1	1,000	0,776
MEAN_EL2	1,000	0,846
MEAN_EL3	1,000	0,700
MEAN_EL4	1,000	0,834
MEAN_GL1	1,000	0,862
MEAN_GL2	1,000	0,747
MEAN_GL3	1,000	0,899
MEAN_GL4	1,000	0,863

Extraktionsmethode: ..

Erklärte Gesamtvarianz							Rotierte Summe der quadrierten Ladungen ^a
Anfängliche Eigenwerte			Summen von quadrierten Faktorladungen für Extraktion			Gesamt	
Komponente	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %	Gesamt	% der Varianz		Kumulierte %
1	6,006	54,597	54,597	6,006	54,597	54,597	5,196
2	2,483	22,573	77,170	2,483	22,573	77,170	4,083
3	0,627	5,701	82,871	0,627	5,701	82,871	3,437
4	0,423	3,844	86,715				
5	0,398	3,617	90,332				
6	0,273	2,482	92,814				
7	0,220	2,000	94,813				
8	0,186	1,692	96,506				
9	0,162	1,470	97,976				
10	0,137	1,247	99,223				
11	0,085	0,777	100,000				

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

a. Wenn Komponenten korreliert sind, können die Summen der quadrierten Ladungen nicht addiert werden, um eine

Komponentenmatrix^a

	Komponente		
	1	2	3
MEAN_EL2	0,858	0,326	
MEAN_EL4	0,828	0,208	0,323
MEAN_EL1	0,806	0,276	0,225
MEAN_IL1	0,799	0,437	-0,129
MEAN_IL3	0,793	0,455	-0,120
MEAN_EL3	0,765		0,334
MEAN_GL4	-0,721	0,585	
MEAN_GL1	-0,706	0,598	
MEAN_GL3	-0,666	0,666	0,110
MEAN_IL2	0,613	0,478	-0,536
MEAN_GL2	-0,493	0,696	0,141

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.
a. 3 Komponenten extrahiert

Mustermatrix^a

	Komponente		
	1	2	3
MEAN_EL4	0,924		
MEAN_EL1	0,826		-0,113
MEAN_EL3	0,796	-0,212	0,164
MEAN_EL2	0,685		-0,334
MEAN_GL3		0,941	
MEAN_GL2	0,136	0,912	
MEAN_GL1		0,879	
MEAN_GL4	-0,150	0,856	
MEAN_IL2			-0,972
MEAN_IL1	0,483		-0,567
MEAN_IL3	0,496		-0,563

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.
a. Die Rotation ist in 9 Iterationen konvergiert.

Strukturmatrix

	Komponente		
	1	2	3
MEAN_EL4	0,913	-0,376	-0,482
MEAN_EL2	0,877	-0,339	-0,706
MEAN_EL1	0,875	-0,322	-0,557
MEAN_EL3	0,796	-0,529	-0,283
MEAN_GL3	-0,416	0,947	0,109
MEAN_GL1	-0,480	0,922	0,155
MEAN_GL4	-0,508	0,919	0,155
MEAN_GL2	-0,241	0,855	
MEAN_IL2	0,488	-0,124	-0,942
MEAN_IL3	0,787	-0,220	-0,829
MEAN_IL1	0,786	-0,238	-0,827

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

Komponentenkorrelationsmatrix

Komponente	1	2	3
1	1,000	-0,415	-0,540
2	-0,415	1,000	0,080
3	-0,540	0,080	1,000

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

IL

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs Alpha	Cronbachs Alpha für standardisierte Items	Anzahl der Items
0,893	0,896	3

EL

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs Alpha	Cronbachs Alpha für standardisierte Items	Anzahl der Items
0,894	0,896	4

GL

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs Alpha	Cronbachs Alpha für standardisierte Items	Anzahl der Items
0,928	0,933	4

3.1.2 Konfirmatorische Faktorenanalyse 1: CLT

Estimator	DWLS					
Optimization method	NLMINB					
Number of model parameters	33					
	Used	Total				
Number of observations	392	629				
Model Test User Model:						
	Standard	Robust				
Test Statistic	405.823	627.999				
Degrees of freedom	87	87				
P-value (Chi-square)	0.000	0.000				
Scaling correction factor		0.709				
Shift parameter		55.616				
simple second-order correction						
Model Test Baseline Model:						
Test statistic	3995.144	809.624				
Degrees of freedom	105	105				
P-value	0.000	0.000				
Scaling correction factor	5.521					
User Model versus Baseline Model:						
Comparative Fit Index (CFI)	0.918	0.232				
Tucker-Lewis Index (TLI)	0.901	0.073				
Robust Comparative Fit Index (CFI)		NA				
Robust Tucker-Lewis Index (TLI)		NA				
Root Mean Square Error of Approximation:						
RMSEA	0.097	0.126				
90 Percent confidence interval - lower	0.087	0.117				
90 Percent confidence interval - upper	0.106	0.135				
P-value RMSEA <= 0.05	0.000	0.000				
Robust RMSEA	NA					
90 Percent confidence interval - lower		NA				
90 Percent confidence interval - upper		NA				
Standardized Root Mean Square Residual:						
SRMR	0.125	0.125				
Parameter Estimates:						
Standard errors	Robust.sem					
Information	Expected					
Information saturated (h1) model	Unstructured					
Latent Variables:						
	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
ICL =~						
MEAN_IL1	1.000				1.468	0.968
MEAN_IL2	0.852	0.063	13.618	0.000	1.251	0.739
MEAN_IL3	0.951	0.037	25.400	0.000	1.396	0.958
MEAN_GA	0.289	0.059	4.852	0.000	0.424	0.391
MEAN_SA	0.494	0.037	13.353	0.000	0.725	0.749
ECL =~						
MEAN_EL1	1.000	1.154	0.804			
MEAN_EL2	1.086	0.048	22.742	0.000	1.253	0.882
MEAN_EL3	0.942	0.054	17.403	0.000	1.087	0.722
MEAN_EL4	1.043	0.045	23.201	0.000	1.204	0.826
MEAN_LE	0.644	0.050	12.901	0.000	0.743	0.736
GCL =~						
MEAN_GL1	1.000				1.533	0.956
MEAN_GL2	0.876	0.058	14.991	0.000	1.344	0.690
MEAN_GL3	1.030	0.040	25.699	0.000	1.579	0.933
MEAN_GL4	1.051	0.029	36.247	0.000	1.612	0.979
MEAN_KZ	0.056	0.053	1.055	0.292	0.085	0.072
Covariances:						
	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
ICL ~~~						
ECL	1.366	0.177	7.723	0.000	0.806	0.806
GCL	-0.482	0.171	-2.816	0.005	-0.214	-0.214
ECL ~~~						
GCL	-0.972	0.164	-5.919	0.000	-0.549	-0.549
Variances:						
	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all

Anhang

.MEAN_IL1	0.146	0.077	1.892	0.058	0.146	0.063
.MEAN_IL2	1.301	0.247	5.265	0.000	1.301	0.454
.MEAN_IL3	0.176	0.085	2.075	0.038	0.176	0.083
.MEAN_GA	0.992	0.085	11.644	0.000	0.992	0.847
.MEAN_SA	0.411	0.042	9.830	0.000	0.411	0.439
.MEAN_EL1	0.728	0.068	10.764	0.000	0.728	0.353
.MEAN_EL2	0.447	0.058	7.683	0.000	0.447	0.222
.MEAN_EL3	1.086	0.103	10.502	0.000	1.086	0.479
.MEAN_EL4	0.674	0.066	10.279	0.000	0.674	0.317
.MEAN_LE	0.467	0.045	10.289	0.000	0.467	0.458
.MEAN_GL1	0.219	0.078	2.807	0.005	0.219	0.085
.MEAN_GL2	1.992	0.219	9.102	0.000	1.992	0.524
.MEAN_GL3	0.374	0.127	2.945	0.003	0.374	0.130
.MEAN_GL4	0.111	0.077	1.432	0.152	0.111	0.041
.MEAN_KZ	1.414	0.117	12.068	0.000	1.414	0.995
ICL	2.155	0.207	10.411	0.000	1.000	1.000
ECL	1.332	0.193	6.902	0.000	1.000	1.000
GCL	2.351	0.227	10.366	0.000	1.000	1.000

R-Square:

	Estimate
MEAN_IL1	0.937
MEAN_IL2	0.546
MEAN_IL3	0.917
MEAN_GA	0.153
MEAN_SA	0.561
MEAN_EL1	0.647
MEAN_EL2	0.778
MEAN_EL3	0.521
MEAN_EL4	0.683
MEAN_LE	0.542
MEAN_GL1	0.915
MEAN_GL2	0.476
MEAN_GL3	0.870
MEAN_GL4	0.959
MEAN_KZ	0.005

Modification Indices:

	lhs	op	rhs	mi	epc	sepc.lv	sepc.all	sepc.nox
37	ICL	=>	MEAN_EL1	0.614	0.091	0.134	0.093	0.093
38	ICL	=>	MEAN_EL2	10.760	0.385	0.565	0.398	0.398
39	ICL	=>	MEAN_EL3	27.662	-0.623	-0.914	-0.607	-0.607
40	ICL	=>	MEAN_EL4	0.153	-0.047	-0.069	-0.047	-0.047
41	ICL	=>	MEAN_LE	1.137	0.090	0.132	0.131	0.131
42	ICL	=>	MEAN_GL1	4.038	-0.105	-0.154	-0.096	-0.096
43	ICL	=>	MEAN_GL2	10.872	0.168	0.246	0.126	0.126
44	ICL	=>	MEAN_GL3	0.004	-0.003	-0.005	-0.003	-0.003
45	ICL	=>	MEAN_GL4	4.116	-0.111	-0.163	-0.099	-0.099
46	ICL	=>	MEAN_KZ	116.688	0.298	0.437	0.367	0.367
47	ECL	=>	MEAN_IL1	12.536	0.565	0.653	0.430	0.430
48	ECL	=>	MEAN_IL2	0.558	-0.114	-0.132	-0.078	-0.078
49	ECL	=>	MEAN_IL3	5.005	0.353	0.407	0.279	0.279
50	ECL	=>	MEAN_GA	51.354	-0.504	-0.581	-0.537	-0.537
51	ECL	=>	MEAN_SA	0.150	-0.036	-0.041	-0.043	-0.043
52	ECL	=>	MEAN_GL1	3.621	-0.160	-0.185	-0.115	-0.115
53	ECL	=>	MEAN_GL2	10.058	0.257	0.296	0.152	0.152
54	ECL	=>	MEAN_GL3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
55	ECL	=>	MEAN_GL4	4.316	-0.183	-0.211	-0.128	-0.128
56	ECL	=>	MEAN_KZ	102.792	0.435	0.502	0.421	0.421
57	GCL	=>	MEAN_IL1	9.836	-0.155	-0.238	-0.157	-0.157
58	GCL	=>	MEAN_IL2	0.477	0.033	0.051	0.030	0.030
59	GCL	=>	MEAN_IL3	4.308	-0.102	-0.157	-0.107	-0.107
60	GCL	=>	MEAN_GA	48.307	0.161	0.247	0.228	0.228
61	GCL	=>	MEAN_SA	0.084	0.009	0.013	0.013	0.013
62	GCL	=>	MEAN_EL1	1.365	0.070	0.107	0.075	0.075
63	GCL	=>	MEAN_EL2	11.256	0.202	0.311	0.219	0.219
64	GCL	=>	MEAN_EL3	27.210	-0.321	-0.492	-0.327	-0.327
65	GCL	=>	MEAN_EL4	0.029	0.011	0.016	0.011	0.011
66	GCL	=>	MEAN_LE	0.040	-0.009	-0.013	-0.013	-0.013
67	MEAN_IL1	~~	MEAN_IL2	0.030	-0.042	-0.042	-0.097	-0.097
68	MEAN_IL1	~~	MEAN_IL3	2.138	-0.358	-0.358	-2.235	-2.235
69	MEAN_IL1	~~	MEAN_GA	0.030	-0.018	-0.018	-0.048	-0.048
70	MEAN_IL1	~~	MEAN_SA	3.591	-0.270	-0.270	-1.105	-1.105
71	MEAN_IL1	~~	MEAN_EL1	0.405	0.131	0.131	0.402	0.402
72	MEAN_IL1	~~	MEAN_EL2	3.078	0.361	0.361	1.415	1.415
73	MEAN_IL1	~~	MEAN_EL3	0.119	-0.070	-0.070	-0.176	-0.176
74	MEAN_IL1	~~	MEAN_EL4	0.251	0.105	0.105	0.335	0.335
75	MEAN_IL1	~~	MEAN_LE	0.042	-0.029	-0.029	-0.113	-0.113
76	MEAN_IL1	~~	MEAN_GL1	3.279	-0.326	-0.326	-1.826	-1.826
77	MEAN_IL1	~~	MEAN_GL2	0.122	0.064	0.064	0.119	0.119
78	MEAN_IL1	~~	MEAN_GL3	1.714	-0.232	-0.232	-0.995	-0.995
79	MEAN_IL1	~~	MEAN_GL4	3.641	-0.359	-0.359	-2.824	-2.824

Anhang

80	MEAN_IL1	~~	MEAN_KZ	15.211	0.423	0.423	0.933	0.933
81	MEAN_IL2	~~	MEAN_IL3	0.113	0.080	0.080	0.166	0.166
82	MEAN_IL2	~~	MEAN_GA	1.219	0.126	0.126	0.111	0.111
83	MEAN_IL2	~~	MEAN_SA	0.035	-0.026	-0.026	-0.036	-0.036
84	MEAN_IL2	~~	MEAN_EL1	0.122	0.072	0.072	0.074	0.074
85	MEAN_IL2	~~	MEAN_EL2	0.956	0.204	0.204	0.268	0.268
86	MEAN_IL2	~~	MEAN_EL3	1.215	-0.223	-0.223	-0.188	-0.188
87	MEAN_IL2	~~	MEAN_EL4	0.497	-0.150	-0.150	-0.160	-0.160
88	MEAN_IL2	~~	MEAN_LE	0.017	-0.019	-0.019	-0.024	-0.024
89	MEAN_IL2	~~	MEAN_GL1	0.131	-0.068	-0.068	-0.128	-0.128
90	MEAN_IL2	~~	MEAN_GL2	2.509	0.321	0.321	0.199	0.199
91	MEAN_IL2	~~	MEAN_GL3	0.048	0.041	0.041	0.058	0.058
92	MEAN_IL2	~~	MEAN_GL4	0.117	-0.066	-0.066	-0.173	-0.173
93	MEAN_IL2	~~	MEAN_KZ	9.482	0.386	0.386	0.285	0.285
94	MEAN_IL3	~~	MEAN_GA	0.285	0.055	0.055	0.132	0.132
95	MEAN_IL3	~~	MEAN_SA	1.639	-0.184	-0.184	-0.683	-0.683
96	MEAN_IL3	~~	MEAN_EL1	0.471	0.147	0.147	0.411	0.411
97	MEAN_IL3	~~	MEAN_EL2	1.730	0.278	0.278	0.992	0.992
98	MEAN_IL3	~~	MEAN_EL3	0.352	-0.127	-0.127	-0.290	-0.290
99	MEAN_IL3	~~	MEAN_EL4	0.049	0.048	0.048	0.141	0.141
100	MEAN_IL3	~~	MEAN_LE	0.275	-0.078	-0.078	-0.272	-0.272
101	MEAN_IL3	~~	MEAN_GL1	2.997	-0.322	-0.322	-1.640	-1.640
102	MEAN_IL3	~~	MEAN_GL2	0.682	0.154	0.154	0.260	0.260
103	MEAN_IL3	~~	MEAN_GL3	0.732	-0.154	-0.154	-0.600	-0.600
104	MEAN_IL3	~~	MEAN_GL4	2.391	-0.302	-0.302	-2.159	-2.159
105	MEAN_IL3	~~	MEAN_KZ	12.365	0.414	0.414	0.830	0.830
106	MEAN_GA	~~	MEAN_SA	43.703	0.475	0.475	0.744	0.744
107	MEAN_GA	~~	MEAN_EL1	1.740	-0.117	-0.117	-0.138	-0.138
108	MEAN_GA	~~	MEAN_EL2	0.022	-0.013	-0.013	-0.020	-0.020
109	MEAN_GA	~~	MEAN_EL3	15.802	-0.370	-0.370	-0.356	-0.356
110	MEAN_GA	~~	MEAN_EL4	1.993	-0.128	-0.128	-0.156	-0.156
111	MEAN_GA	~~	MEAN_LE	8.505	0.215	0.215	0.316	0.316
112	MEAN_GA	~~	MEAN_GL1	4.433	0.194	0.194	0.416	0.416
113	MEAN_GA	~~	MEAN_GL2	11.679	0.376	0.376	0.267	0.267
114	MEAN_GA	~~	MEAN_GL3	9.646	0.303	0.303	0.498	0.498
115	MEAN_GA	~~	MEAN_GL4	7.761	0.268	0.268	0.808	0.808
116	MEAN_GA	~~	MEAN_KZ	108.457	0.947	0.947	0.800	0.800
117	MEAN_SA	~~	MEAN_EL1	0.314	-0.069	-0.069	-0.126	-0.126
118	MEAN_SA	~~	MEAN_EL2	0.001	-0.005	-0.005	-0.011	-0.011
119	MEAN_SA	~~	MEAN_EL3	5.026	-0.283	-0.283	-0.424	-0.424
120	MEAN_SA	~~	MEAN_EL4	0.619	-0.101	-0.101	-0.192	-0.192
121	MEAN_SA	~~	MEAN_LE	11.469	0.318	0.318	0.725	0.725
122	MEAN_SA	~~	MEAN_GL1	0.524	-0.085	-0.085	-0.284	-0.284
123	MEAN_SA	~~	MEAN_GL2	1.412	0.143	0.143	0.158	0.158
124	MEAN_SA	~~	MEAN_GL3	0.002	-0.005	-0.005	-0.014	-0.014
125	MEAN_SA	~~	MEAN_GL4	0.204	-0.055	-0.055	-0.257	-0.257
126	MEAN_SA	~~	MEAN_KZ	49.984	0.577	0.577	0.758	0.758
127	MEAN_EL1	~~	MEAN_EL2	0.934	0.205	0.205	0.359	0.359
128	MEAN_EL1	~~	MEAN_EL3	0.062	0.053	0.053	0.060	0.060
129	MEAN_EL1	~~	MEAN_EL4	2.440	0.343	0.343	0.489	0.489
130	MEAN_EL1	~~	MEAN_LE	1.902	-0.200	-0.200	-0.343	-0.343
131	MEAN_EL1	~~	MEAN_GL1	0.315	0.105	0.105	0.263	0.263
132	MEAN_EL1	~~	MEAN_GL2	1.325	0.213	0.213	0.177	0.177
133	MEAN_EL1	~~	MEAN_GL3	0.383	0.111	0.111	0.214	0.214
134	MEAN_EL1	~~	MEAN_GL4	0.030	-0.033	-0.033	-0.118	-0.118
135	MEAN_EL1	~~	MEAN_KZ	1.043	0.114	0.114	0.112	0.112
136	MEAN_EL2	~~	MEAN_EL3	0.081	-0.060	-0.060	-0.085	-0.085
137	MEAN_EL2	~~	MEAN_EL4	0.710	0.177	0.177	0.322	0.322
138	MEAN_EL2	~~	MEAN_LE	1.222	-0.155	-0.155	-0.339	-0.339
139	MEAN_EL2	~~	MEAN_GL1	1.150	0.198	0.198	0.633	0.633
140	MEAN_EL2	~~	MEAN_GL2	4.073	0.365	0.365	0.387	0.387
141	MEAN_EL2	~~	MEAN_GL3	2.102	0.258	0.258	0.633	0.633
142	MEAN_EL2	~~	MEAN_GL4	0.353	0.115	0.115	0.516	0.516
143	MEAN_EL2	~~	MEAN_KZ	4.427	0.231	0.231	0.290	0.290
144	MEAN_EL3	~~	MEAN_EL4	0.653	0.170	0.170	0.198	0.198
145	MEAN_EL3	~~	MEAN_LE	0.700	-0.122	-0.122	-0.172	-0.172
146	MEAN_EL3	~~	MEAN_GL1	4.684	-0.422	-0.422	-0.864	-0.864
147	MEAN_EL3	~~	MEAN_GL2	4.493	-0.419	-0.419	-0.285	-0.285
148	MEAN_EL3	~~	MEAN_GL3	4.475	-0.408	-0.408	-0.640	-0.640
149	MEAN_EL3	~~	MEAN_GL4	3.686	-0.393	-0.393	-1.133	-1.133
150	MEAN_EL3	~~	MEAN_KZ	1.357	-0.134	-0.134	-0.108	-0.108
151	MEAN_EL4	~~	MEAN_LE	1.368	-0.173	-0.173	-0.309	-0.309
152	MEAN_EL4	~~	MEAN_GL1	0.047	0.041	0.041	0.107	0.107
153	MEAN_EL4	~~	MEAN_GL2	0.170	0.080	0.080	0.069	0.069
154	MEAN_EL4	~~	MEAN_GL3	0.066	0.048	0.048	0.095	0.095
155	MEAN_EL4	~~	MEAN_GL4	0.034	-0.036	-0.036	-0.132	-0.132
156	MEAN_EL4	~~	MEAN_KZ	0.933	0.111	0.111	0.114	0.114
157	MEAN_LE	~~	MEAN_GL1	0.457	-0.095	-0.095	-0.297	-0.297
158	MEAN_LE	~~	MEAN_GL2	0.147	-0.054	-0.054	-0.056	-0.056
159	MEAN_LE	~~	MEAN_GL3	0.044	-0.029	-0.029	-0.069	-0.069
160	MEAN_LE	~~	MEAN_GL4	0.220	-0.068	-0.068	-0.298	-0.298
161	MEAN_LE	~~	MEAN_KZ	10.512	0.296	0.296	0.364	0.364

3.1.3 Konfirmatorische Faktorenanalyse 2: CLT

Estimator	DWLS					
Optimization method	NLMINB					
Number of model parameters	29					
	Used	Total				
Number of observations	392	629				
Model Test User Model:						
Test Statistic	Standard	Robust				
	74.547	296.888				
Degrees of freedom	62	62				
P-value (Chi-square)	0.132	0.000				
Scaling correction factor		0.282				
Shift parameter		32.074				
simple second-order correction						
Model Test Baseline Model:						
Test statistic	3411.851	652.649				
Degrees of freedom	78	78				
P-value	0.000	0.000				
Scaling correction factor	5.802					
User Model versus Baseline Model:						
Comparative Fit Index (CFI)	0.996	0.591				
Tucker-Lewis Index (TLI)	0.995	0.486				
Robust Comparative Fit Index (CFI)		NA				
Robust Tucker-Lewis Index (TLI)		NA				
Root Mean Square Error of Approximation:						
RMSEA	0.023	0.098				
90 Percent confidence interval - lower	0.000	0.087				
90 Percent confidence interval - upper	0.040	0.110				
P-value RMSEA <= 0.05	0.998	0.000				
Robust RMSEA	NA					
90 Percent confidence interval - lower		NA				
90 Percent confidence interval - upper		NA				
Standardized Root Mean Square Residual:						
SRMR	0.069	0.069				
Parameter Estimates:						
Standard errors	Robust.sem					
Information	Expected					
Information saturated (h1) model	Unstructured					
Latent Variables:						
	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
ICL =~						
MEAN_IL1	1.000				1.453	0.958
MEAN_IL2	0.832	0.066	12.658	0.000	1.208	0.714
MEAN_IL3	0.942	0.039	23.884	0.000	1.369	0.939
MEAN_SA	0.453	0.039	11.510	0.000	0.657	0.680
ECL =~						
MEAN_EL1	1.000	1.162	0.809			
MEAN_EL2	1.075	0.046	23.302	0.000	1.248	0.879
MEAN_EL3	0.963	0.053	18.166	0.000	1.119	0.743
MEAN_EL4	1.043	0.044	23.459	0.000	1.211	0.831
MEAN_LE	0.618	0.050	12.436	0.000	0.718	0.711
GCL =~						
MEAN_GL1	1.000				1.529	0.953
MEAN_GL2	0.869	0.059	14.807	0.000	1.328	0.681
MEAN_GL3	1.026	0.040	25.567	0.000	1.568	0.926
MEAN_GL4	1.053	0.029	36.104	0.000	1.610	0.978
Covariances:						
	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
ICL ~~						

Anhang

ECL	1.434	0.177	8.107	0.000	0.850	0.850
GCL	-0.603	0.175	-3.450	0.001	-0.272	-0.272
ECL ~						
GCL	-0.984	0.164	-6.009	0.000	-0.554	-0.554

Variances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
.MEAN_IL1	0.190	0.076	2.519	0.012	0.190	0.083
.MEAN_IL2	1.407	0.245	5.751	0.000	1.407	0.491
.MEAN_IL3	0.252	0.077	3.248	0.001	0.252	0.118
.MEAN_SA	0.504	0.045	11.068	0.000	0.504	0.538
.MEAN_EL1	0.711	0.067	10.653	0.000	0.711	0.345
.MEAN_EL2	0.458	0.058	7.932	0.000	0.458	0.227
.MEAN_EL3	1.015	0.099	10.285	0.000	1.015	0.448
.MEAN_EL4	0.656	0.063	10.480	0.000	0.656	0.309
.MEAN_LE	0.504	0.047	10.709	0.000	0.504	0.495
.MEAN_GL1	0.234	0.079	2.944	0.003	0.234	0.091
.MEAN_GL2	2.034	0.220	9.243	0.000	2.034	0.536
.MEAN_GL3	0.407	0.126	3.227	0.001	0.407	0.142
.MEAN_GL4	0.115	0.079	1.459	0.145	0.115	0.043
ICL	2.110	0.186	11.365	0.000	1.000	1.000
ECL	1.349	0.193	6.985	0.000	1.000	1.000
GCL	2.337	0.229	10.199	0.000	1.000	1.000

R-Square:

	Estimate
MEAN_IL1	0.917
MEAN_IL2	0.509
MEAN_IL3	0.882
MEAN_SA	0.462
MEAN_EL1	0.655
MEAN_EL2	0.773
MEAN_EL3	0.552
MEAN_EL4	0.691
MEAN_LE	0.505
MEAN_GL1	0.909
MEAN_GL2	0.464
MEAN_GL3	0.858
MEAN_GL4	0.957

Modification Indices:

	lhs	op	rhs	mi	epc	sepc.lv	sepc.all	sepc.nox
33	ICL	=	MEAN_EL1	1.035	0.152	0.220	0.153	0.153
34	ICL	=	MEAN_EL2	10.309	0.481	0.698	0.492	0.492
35	ICL	=	MEAN_EL3	21.078	-0.699	-1.016	-0.675	-0.675
36	ICL	=	MEAN_EL4	0.025	-0.024	-0.035	-0.024	-0.024
37	ICL	=	MEAN_LE	0.002	0.005	0.007	0.007	0.007
38	ICL	=	MEAN_GL1	2.387	-0.091	-0.132	-0.083	-0.083
39	ICL	=	MEAN_GL2	11.400	0.191	0.277	0.142	0.142
40	ICL	=	MEAN_GL3	0.073	0.016	0.023	0.014	0.014
41	ICL	=	MEAN_GL4	3.198	-0.111	-0.161	-0.098	-0.098
42	ECL	=	MEAN_IL1	2.446	0.333	0.387	0.255	0.255
43	ECL	=	MEAN_IL2	4.304	-0.409	-0.475	-0.281	-0.281
44	ECL	=	MEAN_IL3	0.390	0.130	0.151	0.103	0.103
45	ECL	=	MEAN_SA	0.134	-0.042	-0.049	-0.051	-0.051
46	ECL	=	MEAN_GL1	2.121	-0.131	-0.152	-0.095	-0.095
47	ECL	=	MEAN_GL2	10.495	0.276	0.321	0.165	0.165
48	ECL	=	MEAN_GL3	0.095	0.028	0.032	0.019	0.019
49	ECL	=	MEAN_GL4	3.280	-0.171	-0.198	-0.120	-0.120
50	GCL	=	MEAN_IL1	1.955	-0.078	-0.118	-0.078	-0.078
51	GCL	=	MEAN_IL2	3.391	0.097	0.149	0.088	0.088
52	GCL	=	MEAN_IL3	0.389	-0.034	-0.052	-0.036	-0.036
53	GCL	=	MEAN_SA	0.243	0.016	0.024	0.025	0.025
54	GCL	=	MEAN_EL1	1.768	0.084	0.128	0.089	0.089
55	GCL	=	MEAN_EL2	10.520	0.206	0.315	0.222	0.222
56	GCL	=	MEAN_EL3	21.588	-0.302	-0.462	-0.307	-0.307
57	GCL	=	MEAN_EL4	0.122	0.023	0.034	0.024	0.024
58	GCL	=	MEAN_LE	0.889	-0.043	-0.066	-0.065	-0.065
59	MEAN_IL1	~	MEAN_IL2	0.124	0.087	0.087	0.168	0.168
60	MEAN_IL1	~	MEAN_IL3	1.157	-0.274	-0.274	-1.251	-1.251
61	MEAN_IL1	~	MEAN_SA	0.517	-0.102	-0.102	-0.330	-0.330
62	MEAN_IL1	~	MEAN_EL1	0.045	0.044	0.044	0.120	0.120
63	MEAN_IL1	~	MEAN_EL2	1.962	0.294	0.294	0.995	0.995

Anhang

64	MEAN_IL1	~	MEAN_EL3	0.925	-0.200	-0.200	-0.455	-0.455
65	MEAN_IL1	~	MEAN_EL4	0.004	0.013	0.013	0.037	0.037
66	MEAN_IL1	~	MEAN_LE	0.070	-0.038	-0.038	-0.124	-0.124
67	MEAN_IL1	~	MEAN_GL1	1.162	-0.197	-0.197	-0.934	-0.934
68	MEAN_IL1	~	MEAN_GL2	0.923	0.178	0.178	0.285	0.285
69	MEAN_IL1	~	MEAN_GL3	0.292	-0.097	-0.097	-0.349	-0.349
70	MEAN_IL1	~	MEAN_GL4	1.350	-0.222	-0.222	-1.496	-1.496
71	MEAN_IL2	~	MEAN_IL3	0.878	0.224	0.224	0.376	0.376
72	MEAN_IL2	~	MEAN_SA	0.815	0.125	0.125	0.148	0.148
73	MEAN_IL2	~	MEAN_EL1	0.033	0.038	0.038	0.038	0.038
74	MEAN_IL2	~	MEAN_EL2	0.776	0.186	0.186	0.231	0.231
75	MEAN_IL2	~	MEAN_EL3	2.064	-0.295	-0.295	-0.247	-0.247
76	MEAN_IL2	~	MEAN_EL4	0.782	-0.190	-0.190	-0.198	-0.198
77	MEAN_IL2	~	MEAN_LE	0.001	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004
78	MEAN_IL2	~	MEAN_GL1	0.024	0.030	0.030	0.052	0.052
79	MEAN_IL2	~	MEAN_GL2	3.946	0.404	0.404	0.239	0.239
80	MEAN_IL2	~	MEAN_GL3	0.574	0.142	0.142	0.187	0.187
81	MEAN_IL2	~	MEAN_GL4	0.041	0.039	0.039	0.097	0.097
82	MEAN_IL3	~	MEAN_SA	0.023	-0.022	-0.022	-0.061	-0.061
83	MEAN_IL3	~	MEAN_EL1	0.151	0.085	0.085	0.200	0.200
84	MEAN_IL3	~	MEAN_EL2	1.156	0.231	0.231	0.681	0.681
85	MEAN_IL3	~	MEAN_EL3	1.128	-0.231	-0.231	-0.456	-0.456
86	MEAN_IL3	~	MEAN_EL4	0.008	-0.020	-0.020	-0.049	-0.049
87	MEAN_IL3	~	MEAN_LE	0.266	-0.077	-0.077	-0.216	-0.216
88	MEAN_IL3	~	MEAN_GL1	1.205	-0.207	-0.207	-0.851	-0.851
89	MEAN_IL3	~	MEAN_GL2	1.866	0.257	0.257	0.359	0.359
90	MEAN_IL3	~	MEAN_GL3	0.030	-0.031	-0.031	-0.098	-0.098
91	MEAN_IL3	~	MEAN_GL4	0.811	-0.178	-0.178	-1.042	-1.042
92	MEAN_SA	~	MEAN_EL1	0.099	-0.039	-0.039	-0.065	-0.065
93	MEAN_SA	~	MEAN_EL2	0.100	0.039	0.039	0.081	0.081
94	MEAN_SA	~	MEAN_EL3	4.681	-0.275	-0.275	-0.384	-0.384
95	MEAN_SA	~	MEAN_EL4	0.292	-0.070	-0.070	-0.121	-0.121
96	MEAN_SA	~	MEAN_LE	14.325	0.354	0.354	0.703	0.703
97	MEAN_SA	~	MEAN_GL1	0.167	-0.048	-0.048	-0.141	-0.141
98	MEAN_SA	~	MEAN_GL2	2.075	0.174	0.174	0.172	0.172
99	MEAN_SA	~	MEAN_GL3	0.081	0.032	0.032	0.072	0.072
100	MEAN_SA	~	MEAN_GL4	0.015	-0.015	-0.015	-0.062	-0.062
101	MEAN_EL1	~	MEAN_EL2	0.891	0.201	0.201	0.351	0.351
102	MEAN_EL1	~	MEAN_EL3	0.000	-0.004	-0.004	-0.005	-0.005
103	MEAN_EL1	~	MEAN_EL4	2.150	0.323	0.323	0.473	0.473
104	MEAN_EL1	~	MEAN_LE	1.357	-0.168	-0.168	-0.281	-0.281
105	MEAN_EL1	~	MEAN_GL1	0.414	0.121	0.121	0.296	0.296
106	MEAN_EL1	~	MEAN_GL2	1.380	0.218	0.218	0.181	0.181
107	MEAN_EL1	~	MEAN_GL3	0.467	0.123	0.123	0.229	0.229
108	MEAN_EL1	~	MEAN_GL4	0.006	-0.015	-0.015	-0.052	-0.052
109	MEAN_EL2	~	MEAN_EL3	0.260	-0.107	-0.107	-0.157	-0.157
110	MEAN_EL2	~	MEAN_EL4	0.674	0.173	0.173	0.315	0.315
111	MEAN_EL2	~	MEAN_LE	0.578	-0.106	-0.106	-0.220	-0.220
112	MEAN_EL2	~	MEAN_GL1	1.196	0.202	0.202	0.618	0.618
113	MEAN_EL2	~	MEAN_GL2	3.928	0.358	0.358	0.371	0.371
114	MEAN_EL2	~	MEAN_GL3	2.086	0.257	0.257	0.596	0.596
115	MEAN_EL2	~	MEAN_GL4	0.399	0.122	0.122	0.531	0.531
116	MEAN_EL3	~	MEAN_EL4	0.275	0.111	0.111	0.136	0.136
117	MEAN_EL3	~	MEAN_LE	0.636	-0.117	-0.117	-0.163	-0.163
118	MEAN_EL3	~	MEAN_GL1	3.901	-0.387	-0.387	-0.793	-0.793
119	MEAN_EL3	~	MEAN_GL2	4.003	-0.396	-0.396	-0.276	-0.276
120	MEAN_EL3	~	MEAN_GL3	3.754	-0.375	-0.375	-0.583	-0.583
121	MEAN_EL3	~	MEAN_GL4	2.950	-0.353	-0.353	-1.031	-1.031
122	MEAN_EL4	~	MEAN_LE	0.900	-0.140	-0.140	-0.244	-0.244
123	MEAN_EL4	~	MEAN_GL1	0.091	0.057	0.057	0.145	0.145
124	MEAN_EL4	~	MEAN_GL2	0.188	0.085	0.085	0.073	0.073
125	MEAN_EL4	~	MEAN_GL3	0.102	0.060	0.060	0.115	0.115
126	MEAN_EL4	~	MEAN_GL4	0.007	-0.017	-0.017	-0.061	-0.061
127	MEAN_LE	~	MEAN_GL1	0.667	-0.115	-0.115	-0.334	-0.334
128	MEAN_LE	~	MEAN_GL2	0.290	-0.076	-0.076	-0.075	-0.075
129	MEAN_LE	~	MEAN_GL3	0.146	-0.052	-0.052	-0.115	-0.115
130	MEAN_LE	~	MEAN_GL4	0.363	-0.087	-0.087	-0.361	-0.361
131	MEAN_GL1	~	MEAN_GL2	0.001	-0.010	-0.010	-0.015	-0.015
132	MEAN_GL1	~	MEAN_GL3	0.513	-0.204	-0.204	-0.659	-0.659
133	MEAN_GL1	~	MEAN_GL4	0.116	-0.098	-0.098	-0.596	-0.596
134	MEAN_GL2	~	MEAN_GL3	8.452	0.841	0.841	0.924	0.924
135	MEAN_GL2	~	MEAN_GL4	0.000	-0.004	-0.004	-0.008	-0.008
136	MEAN_GL3	~	MEAN_GL4	1.807	-0.394	-0.394	-1.816	-1.816

3.1.4 Reliabilität Mitochondrien und Chloroplasten: UEQ

Dimension	Attraktivität		Durchschaubarkeit		Effizienz		Steuerbarkeit		Stimulation		Originalität	
	α	entfernte Items	α	entfernte Items	α	entfernte Items	α	entfernte Items	α	entfernte Items	α	entfernte Items
AR-Steuerung	.89		.74		.63		.71	UEQ8	.85		.68	UEQ3
Gestensteuerung	.89		.81		.66		.69	UEQ8	.86		.62	
LS9: Chloroplast	.83		.70	UEQ4	.55		.70	UEQ8	.82		.68	UEQ3
LS10: Mitochondrium	.91		.85		.73		.71	UEQ8	.89		.64	
Gesamt App	.90	*UEQ1	.75		.72		.53		.87		.68	*UEQ26

*wurden nicht entfernt, da relevant für Benchmark-Vergleich

3.1.5 Reliabilität HoloBrain: UEQ

Dimension	Attraktivität		Durchschaubarkeit		Effizienz		Steuerbarkeit		Stimulation		Originalität	
	α	entfernte Items	α	entfernte Items	α	entfernte Items	α	entfernte Items	α	entfernte Items	α	entfernte Items
HoloBrain-App	.853		.720		.613	UEQ23	.506	UEQ8	.840		.595	UEQ10
Papiermodell	.934		.910		.812	UEQ9	.688		.914		.910	UEQ3

3.1.6 Konfirmatorische Faktorenanalyse 1: UEQ

Estimator	ML	
Optimization method	NLMINB	
Number of model parameters	67	
	Used	Total
Number of observations	240	629
Model Test User Model:		
	Standard	Robust
Test Statistic	557.087	501.518
Degrees of freedom	284	284
P-value (Chi-square)	0.000	0.000
Scaling correction factor	1.111	
Yuan-Bentler correction (Mplus variant)		
Model Test Baseline Model:		
Test statistic	3436.274	2907.606
Degrees of freedom	325	325
P-value	0.000	0.000
Scaling correction factor	1.182	
User Model versus Baseline Model:		
Comparative Fit Index (CFI)	0.912	0.916
Tucker-Lewis Index (TLI)	0.900	0.904
Robust Comparative Fit Index (CFI)		0.921
Robust Tucker-Lewis Index (TLI)		0.909
Loglikelihood and Information Criteria:		
Loglikelihood user model (H0)	-9373.071	-9373.071
Scaling correction factor for the MLR correction	1.470	
Loglikelihood unrestricted model (H1)	-9094.527	-9094.527
Scaling correction factor for the MLR correction	1.179	
Akaike (AIC)	18880.141	18880.141
Bayesian (BIC)	19113.344	19113.344
Sample-size adjusted Bayesian (BIC)	18900.970	18900.970
Root Mean Square Error of Approximation:		
RMSEA	0.063	0.056
90 Percent confidence interval - lower	0.055	0.049
90 Percent confidence interval - upper	0.071	0.064
P-value RMSEA <= 0.05	0.003	0.083

Anhang

Robust RMSEA	0.060
90 Percent confidence interval - lower	0.051
90 Percent confidence interval - upper	0.068

Standardized Root Mean Square Residual:

SRMR	0.062	0.062
------	-------	-------

Parameter Estimates:

Standard errors	Sandwich
Information bread	Observed
Observed information based on	Hessian

Latent Variables:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
Attrak =~						
UEQ16	1.000				1.113	0.829
UEQ1	0.924	0.072	12.874	0.000	1.029	0.724
UEQ12	0.831	0.064	12.994	0.000	0.925	0.797
UEQ24	0.942	0.086	10.919	0.000	1.049	0.791
UEQ25	0.935	0.078	12.041	0.000	1.041	0.789
UEQ14	1.007	0.064	15.705	0.000	1.121	0.807
Durch =~						
UEQ21	1.000				1.044	0.734
UEQ2	0.718	0.097	7.375	0.000	0.750	0.537
UEQ4	0.755	0.092	8.250	0.000	0.789	0.621
UEQ13	0.825	0.093	8.891	0.000	0.861	0.624
Effek =~						
UEQ20	1.000				0.899	0.689
UEQ22	0.719	0.100	7.198	0.000	0.646	0.511
UEQ23	0.910	0.112	8.117	0.000	0.818	0.612
UEQ9	0.955	0.126	7.594	0.000	0.858	0.565
Steu =~						
UEQ8	1.000				0.184	0.141
UEQ11	6.140	3.559	1.725	0.084	1.127	0.790
UEQ17	5.108	2.917	1.751	0.080	0.938	0.668
UEQ19	3.388	1.948	1.739	0.082	0.622	0.467
Stimu =~						
UEQ7	1.000				1.166	0.855
UEQ6	1.114	0.063	17.680	0.000	1.299	0.846
UEQ5	0.737	0.076	9.739	0.000	0.860	0.683
UEQ18	1.026	0.079	12.954	0.000	1.197	0.810
Origi =~						
UEQ15	1.000				0.925	0.749
UEQ3	0.978	0.163	5.994	0.000	0.905	0.523
UEQ10	0.975	0.115	8.482	0.000	0.901	0.718
UEQ26	0.449	0.123	3.644	0.000	0.416	0.270

Anhang

Covariances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
Attrak ~~						
Durch	0.854	0.128	6.650	0.000	0.735	0.735
Effek	0.906	0.131	6.939	0.000	0.905	0.905
Steu	0.189	0.117	1.620	0.105	0.927	0.927
Stimu	1.131	0.150	7.522	0.000	0.871	0.871
Origi	0.707	0.123	5.726	0.000	0.686	0.686
Durch ~~						
Effek	0.864	0.115	7.481	0.000	0.920	0.920
Steu	0.169	0.104	1.615	0.106	0.880	0.880
Stimu	0.668	0.140	4.788	0.000	0.549	0.549
Origi	0.418	0.130	3.215	0.001	0.433	0.433
Effek ~~						
Steu	0.167	0.102	1.641	0.101	1.015	1.015
Stimu	0.781	0.132	5.937	0.000	0.745	0.745
Origi	0.452	0.119	3.780	0.000	0.543	0.543
Steu ~~						
Stimu	0.161	0.095	1.692	0.091	0.752	0.752
Origi	0.077	0.050	1.530	0.126	0.452	0.452
Stimu ~~						
Origi	0.801	0.134	5.967	0.000	0.742	0.742

Variances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
.UEQ16	0.563	0.075	7.504	0.000	0.563	0.312
.UEQ1	0.958	0.183	5.241	0.000	0.958	0.475
.UEQ12	0.491	0.066	7.489	0.000	0.491	0.365
.UEQ24	0.660	0.089	7.439	0.000	0.660	0.375
.UEQ25	0.658	0.103	6.361	0.000	0.658	0.378
.UEQ14	0.671	0.082	8.182	0.000	0.671	0.348
.UEQ21	0.934	0.169	5.528	0.000	0.934	0.461
.UEQ2	1.391	0.255	5.459	0.000	1.391	0.712
.UEQ4	0.991	0.159	6.223	0.000	0.991	0.614
.UEQ13	1.163	0.138	8.411	0.000	1.163	0.610
.UEQ20	0.896	0.126	7.127	0.000	0.896	0.526
.UEQ22	1.181	0.152	7.791	0.000	1.181	0.739
.UEQ23	1.115	0.138	8.063	0.000	1.115	0.625
.UEQ9	1.572	0.168	9.382	0.000	1.572	0.681
.UEQ8	1.668	0.164	10.157	0.000	1.668	0.980
.UEQ11	0.763	0.117	6.520	0.000	0.763	0.375
.UEQ17	1.093	0.183	5.987	0.000	1.093	0.554
.UEQ19	1.383	0.159	8.722	0.000	1.383	0.781
.UEQ7	0.502	0.070	7.171	0.000	0.502	0.270
.UEQ6	0.669	0.108	6.176	0.000	0.669	0.284
.UEQ5	0.846	0.091	9.297	0.000	0.846	0.534
.UEQ18	0.749	0.097	7.734	0.000	0.749	0.343
.UEQ15	0.669	0.129	5.175	0.000	0.669	0.439
.UEQ3	2.170	0.330	6.570	0.000	2.170	0.726
.UEQ10	0.764	0.133	5.756	0.000	0.764	0.485

Anhang

.UEQ26	2.189	0.290	7.552	0.000	2.189	0.927
Attrak	1.239	0.177	6.991	0.000	1.000	1.000
Durch	1.090	0.169	6.432	0.000	1.000	1.000
Effek	0.808	0.134	6.022	0.000	1.000	1.000
Steu	0.034	0.040	0.850	0.395	1.000	1.000
Stimu	1.360	0.201	6.779	0.000	1.000	1.000
Origi	0.855	0.170	5.022	0.000	1.000	1.000

Modification Indices:

	lhs	op	rhs	mi	epc	sepc.lv	sepc.all	sepc.nox
1	Effek	=~	UEQ20	0.476	0.358	0.322	0.247	0.247
2	Steu	=~	UEQ8	0.404	-2.306	-0.423	-0.325	-0.325
3	Attrak	=~	UEQ21	0.059	0.037	0.042	0.029	0.029
4	Attrak	=~	UEQ2	0.035	0.026	0.029	0.021	0.021
5	Attrak	=~	UEQ4	4.263	0.265	0.294	0.232	0.232
6	Attrak	=~	UEQ13	9.241	-0.424	-0.471	-0.342	-0.342
7	Attrak	=~	UEQ20	10.582	0.683	0.760	0.582	0.582
8	Attrak	=~	UEQ22	0.370	0.116	0.129	0.102	0.102
9	Attrak	=~	UEQ23	0.076	0.054	0.060	0.045	0.045
10	Attrak	=~	UEQ9	8.758	-0.666	-0.741	-0.488	-0.488
11	Attrak	=~	UEQ8	17.500	-0.993	-1.106	-0.847	-0.847
12	Attrak	=~	UEQ11	2.861	0.349	0.389	0.273	0.273
13	Attrak	=~	UEQ17	0.586	-0.158	-0.176	-0.125	-0.125
14	Attrak	=~	UEQ19	0.343	0.125	0.139	0.104	0.104
15	Attrak	=~	UEQ7	4.962	-0.333	-0.371	-0.272	-0.272
16	Attrak	=~	UEQ6	10.210	-0.537	-0.598	-0.389	-0.389
17	Attrak	=~	UEQ5	16.048	0.608	0.676	0.537	0.537
18	Attrak	=~	UEQ18	6.122	0.403	0.449	0.304	0.304
19	Attrak	=~	UEQ15	0.154	0.048	0.053	0.043	0.043
20	Attrak	=~	UEQ3	3.436	0.285	0.317	0.183	0.183
21	Attrak	=~	UEQ10	1.312	-0.138	-0.154	-0.122	-0.122
22	Attrak	=~	UEQ26	2.255	-0.211	-0.235	-0.153	-0.153
23	Durch	=~	UEQ16	4.803	0.225	0.235	0.175	0.175
24	Durch	=~	UEQ1	1.687	0.160	0.167	0.118	0.118
25	Durch	=~	UEQ12	2.416	0.144	0.150	0.129	0.129
26	Durch	=~	UEQ24	7.940	-0.300	-0.314	-0.237	-0.237
27	Durch	=~	UEQ25	2.600	-0.171	-0.179	-0.136	-0.136
28	Durch	=~	UEQ14	3.161	-0.194	-0.203	-0.146	-0.146
29	Durch	=~	UEQ20	5.309	-0.691	-0.722	-0.553	-0.553
30	Durch	=~	UEQ22	0.056	0.054	0.056	0.044	0.044
31	Durch	=~	UEQ23	0.824	0.213	0.223	0.167	0.167
32	Durch	=~	UEQ9	13.719	0.999	1.043	0.686	0.686
33	Durch	=~	UEQ8	9.462	0.712	0.744	0.570	0.570
34	Durch	=~	UEQ11	2.743	-0.376	-0.392	-0.275	-0.275
35	Durch	=~	UEQ17	12.441	0.709	0.740	0.527	0.527
36	Durch	=~	UEQ19	0.024	0.031	0.033	0.024	0.024
37	Durch	=~	UEQ7	2.078	-0.114	-0.119	-0.087	-0.087
38	Durch	=~	UEQ6	4.696	-0.194	-0.203	-0.132	-0.132
39	Durch	=~	UEQ5	11.919	0.297	0.310	0.246	0.246

Anhang

40	Durch =~	UEQ18	1.382	0.105	0.109	0.074	0.074
41	Durch =~	UEQ15	1.362	0.106	0.111	0.090	0.090
42	Durch =~	UEQ3	0.500	0.089	0.093	0.054	0.054
43	Durch =~	UEQ10	2.683	-0.148	-0.155	-0.123	-0.123
44	Durch =~	UEQ26	0.164	0.048	0.050	0.032	0.032
45	Effek =~	UEQ16	2.094	0.301	0.270	0.201	0.201
46	Effek =~	UEQ1	1.902	0.341	0.307	0.216	0.216
47	Effek =~	UEQ12	3.443	0.346	0.311	0.268	0.268
48	Effek =~	UEQ24	7.806	-0.600	-0.540	-0.407	-0.407
49	Effek =~	UEQ25	2.084	-0.309	-0.278	-0.211	-0.211
50	Effek =~	UEQ14	3.861	-0.433	-0.389	-0.280	-0.280
51	Effek =~	UEQ21	0.200	0.197	0.177	0.125	0.125
52	Effek =~	UEQ2	0.145	0.134	0.121	0.086	0.086
53	Effek =~	UEQ4	1.513	0.406	0.365	0.287	0.287
54	Effek =~	UEQ13	13.524	-1.322	-1.188	-0.861	-0.861
55	Effek =~	UEQ8	0.001	-0.015	-0.013	-0.010	-0.010
56	Effek =~	UEQ11	1.577	0.491	0.441	0.309	0.309
57	Effek =~	UEQ17	5.554	0.841	0.756	0.538	0.538
58	Effek =~	UEQ19	0.407	0.225	0.203	0.152	0.152
59	Effek =~	UEQ7	4.550	-0.254	-0.228	-0.167	-0.167
60	Effek =~	UEQ6	4.175	-0.275	-0.247	-0.161	-0.161
61	Effek =~	UEQ5	14.024	0.479	0.430	0.342	0.342
62	Effek =~	UEQ18	2.354	0.204	0.184	0.124	0.124
63	Effek =~	UEQ15	0.567	0.093	0.084	0.068	0.068
64	Effek =~	UEQ3	2.004	0.229	0.206	0.119	0.119
65	Effek =~	UEQ10	2.046	-0.175	-0.157	-0.125	-0.125
66	Effek =~	UEQ26	0.193	-0.066	-0.059	-0.039	-0.039
67	Steu =~	UEQ16	8.935	3.158	0.580	0.432	0.432
68	Steu =~	UEQ1	3.908	2.499	0.459	0.323	0.323
69	Steu =~	UEQ12	5.026	2.129	0.391	0.337	0.337
70	Steu =~	UEQ24	12.137	-3.814	-0.700	-0.528	-0.528
71	Steu =~	UEQ25	0.812	-0.983	-0.181	-0.137	-0.137
72	Steu =~	UEQ14	15.964	-4.484	-0.823	-0.593	-0.593
73	Steu =~	UEQ21	0.046	0.317	0.058	0.041	0.041
74	Steu =~	UEQ2	0.122	-0.450	-0.083	-0.059	-0.059
75	Steu =~	UEQ4	0.960	1.164	0.214	0.168	0.168
76	Steu =~	UEQ13	4.598	-2.771	-0.509	-0.369	-0.369
77	Steu =~	UEQ20	41.908	23.518	4.317	3.307	3.307
78	Steu =~	UEQ22	0.000	0.018	0.003	0.003	0.003
79	Steu =~	UEQ23	0.466	1.106	0.203	0.152	0.152
80	Steu =~	UEQ9	0.001	-0.057	-0.010	-0.007	-0.007
81	Steu =~	UEQ7	3.812	-1.119	-0.205	-0.151	-0.151
82	Steu =~	UEQ6	7.382	-1.762	-0.323	-0.211	-0.211
83	Steu =~	UEQ5	11.027	2.053	0.377	0.299	0.299
84	Steu =~	UEQ18	5.945	1.566	0.288	0.195	0.195
85	Steu =~	UEQ15	0.501	0.404	0.074	0.060	0.060
86	Steu =~	UEQ3	3.114	1.301	0.239	0.138	0.138
87	Steu =~	UEQ10	2.617	-0.913	-0.168	-0.133	-0.133
88	Steu =~	UEQ26	0.952	-0.663	-0.122	-0.079	-0.079
89	Stimu =~	UEQ16	1.927	-0.180	-0.209	-0.156	-0.156

Anhang

90	Stimu =~	UEQ1	0.184	-0.066	-0.077	-0.054	-0.054
91	Stimu =~	UEQ12	5.698	-0.278	-0.324	-0.279	-0.279
92	Stimu =~	UEQ24	2.595	0.216	0.252	0.190	0.190
93	Stimu =~	UEQ25	0.620	-0.105	-0.123	-0.093	-0.093
94	Stimu =~	UEQ14	9.940	0.433	0.505	0.364	0.364
95	Stimu =~	UEQ21	0.058	0.024	0.028	0.020	0.020
96	Stimu =~	UEQ2	1.893	0.135	0.157	0.112	0.112
97	Stimu =~	UEQ4	2.862	0.148	0.173	0.136	0.136
98	Stimu =~	UEQ13	10.436	-0.308	-0.359	-0.260	-0.260
99	Stimu =~	UEQ20	3.239	0.207	0.242	0.185	0.185
100	Stimu =~	UEQ22	2.189	0.167	0.195	0.154	0.154
101	Stimu =~	UEQ23	0.867	0.109	0.127	0.095	0.095
102	Stimu =~	UEQ9	18.316	-0.573	-0.669	-0.440	-0.440
103	Stimu =~	UEQ8	24.103	-0.614	-0.716	-0.549	-0.549
104	Stimu =~	UEQ11	1.835	0.172	0.200	0.140	0.140
105	Stimu =~	UEQ17	1.818	-0.159	-0.186	-0.132	-0.132
106	Stimu =~	UEQ19	1.807	0.160	0.187	0.140	0.140
107	Stimu =~	UEQ15	0.824	0.140	0.163	0.132	0.132
108	Stimu =~	UEQ3	6.471	0.452	0.527	0.305	0.305
109	Stimu =~	UEQ10	4.530	-0.320	-0.374	-0.298	-0.298
110	Stimu =~	UEQ26	4.320	-0.332	-0.387	-0.252	-0.252
111	Origi =~	UEQ16	5.044	-0.234	-0.216	-0.161	-0.161
112	Origi =~	UEQ1	3.272	-0.229	-0.212	-0.149	-0.149
113	Origi =~	UEQ12	8.675	-0.278	-0.257	-0.222	-0.222
114	Origi =~	UEQ24	6.644	0.281	0.260	0.196	0.196
115	Origi =~	UEQ25	0.169	-0.045	-0.041	-0.031	-0.031
116	Origi =~	UEQ14	23.999	0.545	0.504	0.363	0.363
117	Origi =~	UEQ21	0.168	-0.048	-0.045	-0.031	-0.031
118	Origi =~	UEQ2	0.924	0.112	0.104	0.074	0.074
119	Origi =~	UEQ4	6.976	0.275	0.254	0.200	0.200
120	Origi =~	UEQ13	7.366	-0.307	-0.284	-0.205	-0.205
121	Origi =~	UEQ20	0.017	0.016	0.015	0.011	0.011
122	Origi =~	UEQ22	0.991	0.119	0.110	0.087	0.087
123	Origi =~	UEQ23	0.508	0.089	0.082	0.061	0.061
124	Origi =~	UEQ9	6.942	-0.375	-0.347	-0.228	-0.228
125	Origi =~	UEQ8	13.693	-0.455	-0.421	-0.323	-0.323

3.1.7 Konfirmatorische Faktorenanalyse 2: UEQ

Estimator	ML	
Optimization method	NLMINB	
Number of model parameters	59	
	Used	Total
Number of observations	240	629

Model Test User Model:

	Standard	Robust
Test Statistic	362.110	330.532
Degrees of freedom	194	194
P-value (Chi-square)	0.000	0.000
Scaling correction factor	1.096	
Yuan-Bentler correction (Mplus variant)		

Model Test Baseline Model:

Test statistic	2685.873	2255.788
Degrees of freedom	231	231
P-value	0.000	0.000
Scaling correction factor	1.191	

User Model versus Baseline Model:

Comparative Fit Index (CFI)	0.932	0.933
Tucker-Lewis Index (TLI)	0.918	0.920
Robust Comparative Fit Index (CFI)		0.938
Robust Tucker-Lewis Index (TLI)		0.926

Loglikelihood and Information Criteria:

Loglikelihood user model (H0)	-7997.137	-7997.137
Scaling correction factor	1.498	
for the MLR correction		
Loglikelihood unrestricted model (H1)	-7816.082	-7816.082
Scaling correction factor	1.189	
for the MLR correction		
Akaike (AIC)	16112.273	16112.273
Bayesian (BIC)	16317.631	16317.631
Sample-size adjusted Bayesian (BIC)	16130.615	16130.615

Root Mean Square Error of Approximation:

RMSEA	0.060	0.054
90 Percent confidence interval - lower	0.050	0.044
90 Percent confidence interval - upper	0.070	0.064
P-value RMSEA <= 0.05	0.043	0.231

Anhang

Robust RMSEA	0.057
90 Percent confidence interval - lower	0.046
90 Percent confidence interval - upper	0.067

Standardized Root Mean Square Residual:

SRMR	0.053	0.053
------	-------	-------

Parameter Estimates:

Standard errors	Sandwich
Information bread	Observed
Observed information based on	Hessian

Latent Variables:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
Attrak =~						
UEQ16	1.000				1.124	0.837
UEQ1	0.922	0.074	12.378	0.000	1.036	0.730
UEQ12	0.830	0.067	12.305	0.000	0.933	0.804
UEQ24	0.916	0.085	10.820	0.000	1.030	0.776
UEQ25	0.929	0.077	12.003	0.000	1.044	0.791
Durch =~						
UEQ21	1.000				1.048	0.736
UEQ2	0.719	0.099	7.282	0.000	0.753	0.539
UEQ4	0.753	0.091	8.263	0.000	0.788	0.621
UEQ13	0.815	0.090	9.023	0.000	0.854	0.619
Effek =~						
UEQ20	1.000				0.903	0.692
UEQ22	0.710	0.100	7.096	0.000	0.642	0.508
UEQ23	0.902	0.112	8.069	0.000	0.815	0.610
UEQ9	0.952	0.125	7.616	0.000	0.860	0.566
Steu =~						
UEQ11	1.000				1.124	0.788
UEQ17	0.835	0.091	9.219	0.000	0.938	0.668
UEQ19	0.556	0.081	6.858	0.000	0.625	0.470
Stimu =~						
UEQ7	1.000				1.233	0.903
UEQ6	1.064	0.076	13.924	0.000	1.312	0.855
Origi =~						
UEQ15	1.000				0.937	0.759
UEQ3	0.928	0.157	5.900	0.000	0.870	0.503
UEQ10	0.968	0.121	7.989	0.000	0.907	0.722
UEQ26	0.460	0.119	3.855	0.000	0.431	0.280

Anhang

Covariances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
Attrak ~~						
Durch	0.869	0.131	6.634	0.000	0.738	0.738
Effek	0.929	0.132	7.052	0.000	0.915	0.915
Steu	1.205	0.145	8.288	0.000	0.954	0.954
Stimu	1.095	0.157	6.998	0.000	0.791	0.791
Origi	0.672	0.125	5.390	0.000	0.639	0.639
Durch ~~						
Effek	0.871	0.116	7.533	0.000	0.920	0.920
Steu	1.030	0.127	8.105	0.000	0.875	0.875
Stimu	0.641	0.144	4.457	0.000	0.497	0.497
Origi	0.423	0.133	3.192	0.001	0.431	0.431
Effek ~~						
Steu	1.030	0.139	7.416	0.000	1.014	1.014
Stimu	0.749	0.137	5.462	0.000	0.673	0.673
Origi	0.458	0.122	3.744	0.000	0.541	0.541
Steu ~~						
Stimu	0.953	0.153	6.227	0.000	0.688	0.688
Origi	0.486	0.129	3.756	0.000	0.461	0.461
Stimu ~~						
Origi	0.841	0.138	6.094	0.000	0.728	0.728

Variances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
.UEQ16	0.539	0.075	7.172	0.000	0.539	0.299
.UEQ1	0.943	0.182	5.171	0.000	0.943	0.468
.UEQ12	0.476	0.063	7.506	0.000	0.476	0.354
.UEQ24	0.699	0.095	7.329	0.000	0.699	0.397
.UEQ25	0.652	0.100	6.501	0.000	0.652	0.375
.UEQ21	0.927	0.170	5.454	0.000	0.927	0.458
.UEQ2	1.387	0.256	5.420	0.000	1.387	0.710
.UEQ4	0.992	0.160	6.209	0.000	0.992	0.615
.UEQ13	1.176	0.139	8.490	0.000	1.176	0.617
.UEQ20	0.888	0.124	7.154	0.000	0.888	0.521
.UEQ22	1.186	0.151	7.846	0.000	1.186	0.742
.UEQ23	1.120	0.140	7.996	0.000	1.120	0.628
.UEQ9	1.570	0.168	9.329	0.000	1.570	0.680
.UEQ11	0.770	0.119	6.486	0.000	0.770	0.379
.UEQ17	1.092	0.182	6.006	0.000	1.092	0.554
.UEQ19	1.379	0.156	8.826	0.000	1.379	0.779
.UEQ7	0.343	0.085	4.028	0.000	0.343	0.184
.UEQ6	0.636	0.122	5.230	0.000	0.636	0.270
.UEQ15	0.647	0.131	4.924	0.000	0.647	0.424
.UEQ3	2.233	0.330	6.757	0.000	2.233	0.747
.UEQ10	0.755	0.132	5.733	0.000	0.755	0.479
.UEQ26	2.176	0.291	7.488	0.000	2.176	0.921
Attrak	1.262	0.180	7.021	0.000	1.000	1.000
Durch	1.097	0.170	6.448	0.000	1.000	1.000
Effek	0.816	0.135	6.045	0.000	1.000	1.000

Anhang

Steu	1.263	0.161	7.859	0.000	1.000	1.000
Stimu	1.520	0.220	6.916	0.000	1.000	1.000
Origi	0.878	0.173	5.064	0.000	1.000	1.000

Modification Indices:

	lhs	op	rhs	mi	epc	sepc.lv	sepc.all	sepc.nox
1	Effek	=~	UEQ20	0.525	0.377	0.341	0.261	0.261
2	Steu	=~	UEQ11	0.039	0.078	0.088	0.061	0.061
3	Origi	=~	UEQ15	0.012	-0.461	-0.432	-0.350	-0.350
4	Attrak	=~	UEQ21	0.029	0.027	0.031	0.022	0.022
5	Attrak	=~	UEQ2	0.116	0.049	0.055	0.040	0.040
6	Attrak	=~	UEQ4	3.386	0.245	0.275	0.217	0.217
7	Attrak	=~	UEQ13	9.450	-0.444	-0.499	-0.362	-0.362
8	Attrak	=~	UEQ20	14.397	0.839	0.943	0.723	0.723
9	Attrak	=~	UEQ22	0.222	0.093	0.104	0.082	0.082
10	Attrak	=~	UEQ23	0.064	0.050	0.057	0.042	0.042
11	Attrak	=~	UEQ9	7.839	-0.646	-0.726	-0.478	-0.478
12	Attrak	=~	UEQ11	2.590	0.423	0.476	0.334	0.334
13	Attrak	=~	UEQ17	0.665	-0.190	-0.213	-0.152	-0.152
14	Attrak	=~	UEQ19	0.571	0.184	0.207	0.156	0.156
15	Attrak	=~	UEQ7	0.458	-0.126	-0.142	-0.104	-0.104
16	Attrak	=~	UEQ6	0.279	0.104	0.117	0.076	0.076
17	Attrak	=~	UEQ15	0.052	0.025	0.028	0.023	0.023
18	Attrak	=~	UEQ3	3.845	0.276	0.310	0.179	0.179
19	Attrak	=~	UEQ10	1.023	-0.110	-0.124	-0.099	-0.099
20	Attrak	=~	UEQ26	2.246	-0.194	-0.218	-0.142	-0.142
21	Durch	=~	UEQ16	2.350	0.169	0.177	0.132	0.132
22	Durch	=~	UEQ1	0.684	0.107	0.112	0.079	0.079
23	Durch	=~	UEQ12	1.015	0.099	0.103	0.089	0.089
24	Durch	=~	UEQ24	6.812	-0.301	-0.315	-0.237	-0.237
25	Durch	=~	UEQ25	5.064	-0.254	-0.266	-0.202	-0.202
26	Durch	=~	UEQ20	5.421	-0.629	-0.659	-0.505	-0.505
27	Durch	=~	UEQ22	0.240	0.110	0.115	0.091	0.091
28	Durch	=~	UEQ23	1.000	0.228	0.239	0.179	0.179
29	Durch	=~	UEQ9	12.163	0.921	0.964	0.635	0.635
30	Durch	=~	UEQ11	1.459	-0.284	-0.298	-0.209	-0.209
31	Durch	=~	UEQ17	11.046	0.622	0.651	0.464	0.464
32	Durch	=~	UEQ19	0.037	0.037	0.038	0.029	0.029
33	Durch	=~	UEQ7	0.128	-0.033	-0.034	-0.025	-0.025
34	Durch	=~	UEQ6	0.059	0.024	0.025	0.016	0.016
35	Durch	=~	UEQ15	1.216	0.100	0.105	0.085	0.085
36	Durch	=~	UEQ3	0.950	0.123	0.129	0.074	0.074
37	Durch	=~	UEQ10	3.197	-0.161	-0.169	-0.135	-0.135
38	Durch	=~	UEQ26	0.108	0.039	0.040	0.026	0.026
39	Effek	=~	UEQ16	0.221	0.108	0.098	0.073	0.073
40	Effek	=~	UEQ1	0.610	0.207	0.187	0.132	0.132
41	Effek	=~	UEQ12	1.420	0.242	0.218	0.188	0.188
42	Effek	=~	UEQ24	6.157	-0.589	-0.532	-0.401	-0.401
43	Effek	=~	UEQ25	3.544	-0.439	-0.397	-0.301	-0.301

Anhang

44	Effek =~ UEQ21	0.029	0.073	0.066	0.046	0.046
45	Effek =~ UEQ2	0.266	0.181	0.164	0.117	0.117
46	Effek =~ UEQ4	1.716	0.429	0.387	0.305	0.305
47	Effek =~ UEQ13	12.542	-1.258	-1.136	-0.823	-0.823
48	Effek =~ UEQ11	1.964	0.636	0.574	0.403	0.403
49	Effek =~ UEQ17	4.744	0.671	0.606	0.431	0.431
50	Effek =~ UEQ19	0.320	0.190	0.172	0.129	0.129
51	Effek =~ UEQ7	1.059	-0.144	-0.130	-0.095	-0.095
52	Effek =~ UEQ6	0.814	0.134	0.121	0.079	0.079
53	Effek =~ UEQ15	0.251	0.061	0.055	0.044	0.044
54	Effek =~ UEQ3	2.683	0.260	0.235	0.136	0.136
55	Effek =~ UEQ10	1.775	-0.159	-0.144	-0.115	-0.115
56	Effek =~ UEQ26	0.250	-0.073	-0.066	-0.043	-0.043
57	Steu =~ UEQ16	3.028	0.394	0.442	0.330	0.330
58	Steu =~ UEQ1	1.243	0.288	0.324	0.228	0.228
59	Steu =~ UEQ12	1.359	0.232	0.260	0.224	0.224
60	Steu =~ UEQ24	16.195	-0.934	-1.050	-0.791	-0.791
61	Steu =~ UEQ25	3.087	-0.401	-0.451	-0.341	-0.341
62	Steu =~ UEQ21	0.002	0.010	0.011	0.008	0.008
63	Steu =~ UEQ2	0.008	-0.018	-0.021	-0.015	-0.015
64	Steu =~ UEQ4	1.272	0.208	0.234	0.184	0.184
65	Steu =~ UEQ13	4.776	-0.438	-0.492	-0.356	-0.356
66	Steu =~ UEQ20	15.958	1.346	1.513	1.159	1.159
67	Steu =~ UEQ22	0.023	-0.038	-0.042	-0.033	-0.033
68	Steu =~ UEQ23	0.259	0.124	0.140	0.104	0.104
69	Steu =~ UEQ9	0.146	-0.109	-0.122	-0.081	-0.081
70	Steu =~ UEQ7	0.099	-0.034	-0.039	-0.028	-0.028
71	Steu =~ UEQ6	0.057	0.028	0.031	0.020	0.020
72	Steu =~ UEQ15	0.181	0.039	0.044	0.036	0.036
73	Steu =~ UEQ3	4.016	0.240	0.269	0.156	0.156
74	Steu =~ UEQ10	2.130	-0.133	-0.150	-0.119	-0.119
75	Steu =~ UEQ26	1.097	-0.115	-0.130	-0.084	-0.084
76	Stimu =~ UEQ16	0.221	-0.044	-0.054	-0.040	-0.040
77	Stimu =~ UEQ1	0.451	0.074	0.091	0.064	0.064
78	Stimu =~ UEQ12	5.924	-0.203	-0.250	-0.216	-0.216
79	Stimu =~ UEQ24	5.489	0.230	0.284	0.214	0.214
80	Stimu =~ UEQ25	0.005	0.007	0.008	0.006	0.006
81	Stimu =~ UEQ21	0.020	-0.013	-0.016	-0.011	-0.011
82	Stimu =~ UEQ2	3.863	0.173	0.213	0.152	0.152
83	Stimu =~ UEQ4	1.105	0.083	0.102	0.080	0.080
84	Stimu =~ UEQ13	7.006	-0.226	-0.279	-0.202	-0.202
85	Stimu =~ UEQ20	2.643	0.158	0.195	0.149	0.149
86	Stimu =~ UEQ22	1.810	0.128	0.158	0.125	0.125
87	Stimu =~ UEQ23	1.709	0.129	0.159	0.119	0.119
88	Stimu =~ UEQ9	19.552	-0.500	-0.616	-0.406	-0.406
89	Stimu =~ UEQ11	0.140	0.041	0.051	0.036	0.036
90	Stimu =~ UEQ17	1.359	-0.118	-0.145	-0.103	-0.103
91	Stimu =~ UEQ19	1.590	0.128	0.157	0.118	0.118
92	Stimu =~ UEQ15	0.553	0.111	0.136	0.110	0.110
93	Stimu =~ UEQ3	4.207	0.338	0.416	0.241	0.241

Anhang

94 Stimu =~ UEQ10 2.591 -0.231 -0.285 -0.227 -0.227
95 Stimu =~ UEQ26 3.281 -0.269 -0.332 -0.216 -0.216
96 Origi =~ UEQ16 0.776 -0.086 -0.081 -0.060 -0.060
97 Origi =~ UEQ1 0.666 -0.096 -0.090 -0.063 -0.063
98 Origi =~ UEQ12 4.074 -0.178 -0.166 -0.144 -0.144
99 Origi =~ UEQ24 12.577 0.369 0.346 0.261 0.261
100 Origi =~ UEQ25 0.253 0.051 0.048 0.036 0.036
101 Origi =~ UEQ21 0.281 -0.062 -0.058 -0.041 -0.041
102 Origi =~ UEQ2 1.237 0.129 0.120 0.086 0.086
103 Origi =~ UEQ4 5.727 0.246 0.231 0.182 0.182
104 Origi =~ UEQ13 6.633 -0.288 -0.270 -0.196 -0.196
105 Origi =~ UEQ20 0.007 0.010 0.009 0.007 0.007
106 Origi =~ UEQ22 1.067 0.121 0.113 0.090 0.090
107 Origi =~ UEQ23 0.830 0.111 0.104 0.078 0.078
108 Origi =~ UEQ9 6.669 -0.359 -0.336 -0.221 -0.221
109 Origi =~ UEQ11 0.250 -0.064 -0.060 -0.042 -0.042
110 Origi =~ UEQ17 0.012 0.013 0.012 0.009 0.009
111 Origi =~ UEQ19 0.552 0.086 0.081 0.061 0.061
112 Origi =~ UEQ7 0.077 0.045 0.042 0.031 0.031
113 Origi =~ UEQ6 0.065 -0.044 -0.041 -0.027 -0.027
114 UEQ16 ^^ UEQ1 1.059 0.056 0.056 0.079 0.079
115 UEQ16 ^^ UEQ12 5.019 -0.093 -0.093 -0.183 -0.183
116 UEQ16 ^^ UEQ24 0.459 -0.033 -0.033 -0.054 -0.054
117 UEQ16 ^^ UEQ25 0.801 -0.043 -0.043 -0.072 -0.072
118 UEQ16 ^^ UEQ21 0.674 0.046 0.046 0.066 0.066
119 UEQ16 ^^ UEQ2 0.049 -0.014 -0.014 -0.016 -0.016
120 UEQ16 ^^ UEQ4 0.009 0.005 0.005 0.007 0.007
121 UEQ16 ^^ UEQ13 0.055 0.014 0.014 0.017 0.017
122 UEQ16 ^^ UEQ20 0.208 0.024 0.024 0.035 0.035
123 UEQ16 ^^ UEQ22 0.088 0.017 0.017 0.022 0.022
124 UEQ16 ^^ UEQ23 1.131 -0.061 -0.061 -0.079 -0.079
125 UEQ16 ^^ UEQ9 1.356 -0.079 -0.079 -0.086 -0.086

3.1.8 Hauptkomponentenanalyse: ELU

Korrelationsmatrix

	LernenAR_LE 1	LernenAR_LE 2	LernenAR_LE 3	LernenAR_LE 4	LernenAR_LE 5	LernenAR_LE 6	LernenETM_L E1	LernenETM_L E2	LernenETM_L E3	LernenETM_L E5	LernenETM_L E4	LernenETM_L E6	
Korrelation	LernenAR_LE1	1,000	0,768	0,526	0,713	0,665	0,544	-0,482	-0,580	-0,176	-0,404	-0,201	0,031
	LernenAR_LE2	0,768	1,000	0,627	0,763	0,809	0,672	-0,474	-0,517	-0,187	-0,342	-0,093	0,144
	LernenAR_LE3	0,526	0,627	1,000	0,567	0,557	0,510	-0,259	-0,299	-0,020	-0,164	0,030	0,208
	LernenAR_LE4	0,713	0,763	0,567	1,000	0,670	0,579	-0,357	-0,449	-0,074	-0,234	-0,103	0,085
	LernenAR_LE5	0,665	0,809	0,557	0,670	1,000	0,612	-0,372	-0,433	-0,108	-0,235	-0,102	0,064
	LernenAR_LE6	0,544	0,672	0,510	0,579	0,612	1,000	-0,287	-0,316	-0,087	-0,181	-0,061	0,198
	LernenETM_LE1	-0,482	-0,474	-0,259	-0,357	-0,372	-0,287	1,000	0,669	0,495	0,526	0,512	0,173
	LernenETM_LE2	-0,580	-0,517	-0,299	-0,449	-0,433	-0,316	0,669	1,000	0,499	0,483	0,424	0,121
	LernenETM_LE3	-0,176	-0,187	-0,020	-0,074	-0,108	-0,087	0,495	0,499	1,000	0,311	0,327	0,108
	LernenETM_LE5	-0,404	-0,342	-0,164	-0,234	-0,235	-0,181	0,526	0,483	0,311	1,000	0,422	0,282
	LernenETM_LE4	-0,201	-0,093	0,030	-0,103	-0,102	-0,061	0,512	0,424	0,327	0,422	1,000	0,422
	LernenETM_LE6	0,031	0,144	0,208	0,085	0,064	0,198	0,173	0,121	0,108	0,282	0,422	1,000

KMO- und Bartlett-Test

Maß der Stichprobeneignung nach	0,890
Bartlett-Test auf	Ungefährtes Chi-Quadrat
Sphärizität	2037,040
df	66
Signifikanz nach Bartlett	0,000

Anti-Image-Matrizen

	LernenAR_LE 1	LernenAR_LE 2	LernenAR_LE 3	LernenAR_LE 4	LernenAR_LE 5	LernenAR_LE 6	LernenETM_L E1	LernenETM_L E2	LernenETM_L E3	LernenETM_L E5	LernenETM_L E4	LernenETM_L E6	
Anti-Image-Kovarianz	LernenAR_LE1	0,318	-0,060	-0,021	-0,089	-0,023	-0,011	0,009	0,081	-0,044	0,065	0,009	-0,002
	LernenAR_LE2	-0,060	0,178	-0,048	-0,072	-0,114	-0,065	0,042	0,005	0,026	0,048	-0,049	-0,046
	LernenAR_LE3	-0,021	-0,048	0,553	-0,057	-0,034	-0,053	0,019	0,004	-0,048	0,009	-0,040	-0,073
	LernenAR_LE4	-0,089	-0,072	-0,057	0,351	-0,017	-0,041	-0,014	0,033	-0,051	-0,049	0,017	0,027
	LernenAR_LE5	-0,023	-0,114	-0,034	-0,017	0,318	-0,056	-0,008	0,015	-0,025	-0,052	0,014	0,061
	LernenAR_LE6	-0,011	-0,065	-0,053	-0,041	-0,056	0,504	-0,006	-0,025	0,008	-0,005	0,045	-0,089
	LernenETM_LE1	0,009	0,042	0,019	-0,014	-0,008	-0,006	0,407	-0,114	-0,119	-0,087	-0,143	-0,005
	LernenETM_LE2	0,081	0,005	0,004	0,033	0,015	-0,025	-0,114	0,399	-0,160	-0,049	-0,060	0,004
	LernenETM_LE3	-0,044	0,026	-0,048	-0,051	-0,025	0,008	-0,119	-0,160	0,653	-0,013	-0,025	0,023
	LernenETM_LE5	0,065	0,048	0,009	-0,049	-0,052	-0,005	-0,087	-0,049	-0,013	0,605	-0,080	-0,138
	LernenETM_LE4	0,009	-0,049	-0,040	0,017	0,014	0,045	-0,143	-0,060	-0,025	-0,080	0,575	-0,195
	LernenETM_LE6	-0,002	-0,046	-0,073	0,027	0,061	-0,089	-0,005	0,004	0,023	-0,138	-0,195	0,715
Anti-Image-Korrelation	LernenAR_LE1	,928 ^a	-0,252	-0,049	-0,265	-0,073	-0,028	0,026	0,226	-0,096	0,149	0,021	-0,005
	LernenAR_LE2	-0,252	,862 ^a	-0,153	-0,288	-0,478	-0,218	0,155	0,017	0,077	0,145	-0,152	-0,128
	LernenAR_LE3	-0,049	-0,153	,954 ^a	-0,129	-0,080	-0,101	0,041	0,010	-0,080	0,015	-0,071	-0,116
	LernenAR_LE4	-0,265	-0,288	-0,129	,923 ^a	-0,052	-0,097	-0,036	0,087	-0,106	-0,107	0,037	0,054
	LernenAR_LE5	-0,073	-0,478	-0,080	-0,052	,898 ^a	-0,141	-0,022	0,041	-0,054	-0,118	0,034	0,128
	LernenAR_LE6	-0,028	-0,218	-0,101	-0,097	-0,141	,943 ^a	-0,014	-0,055	0,013	-0,009	0,083	-0,148
	LernenETM_LE1	0,026	0,155	0,041	-0,036	-0,022	-0,014	,884 ^a	-0,283	-0,232	-0,176	-0,295	-0,010
	LernenETM_LE2	0,226	0,017	0,010	0,087	0,041	-0,055	-0,283	,896 ^a	-0,313	-0,099	-0,126	0,008
	LernenETM_LE3	-0,096	0,077	-0,080	-0,106	-0,054	0,013	-0,232	-0,313	,808 ^a	-0,021	-0,041	0,033
	LernenETM_LE5	0,149	0,145	0,015	-0,107	-0,118	-0,009	-0,176	-0,099	-0,021	,884 ^a	-0,135	-0,210
	LernenETM_LE4	0,021	-0,152	-0,071	0,037	0,034	0,083	-0,295	-0,126	-0,041	-0,135	,795 ^a	-0,304
	LernenETM_LE6	-0,005	-0,128	-0,116	0,054	0,128	-0,148	-0,010	0,008	0,033	-0,210	-0,304	,673 ^a

a. Maß der Stichprobeneignung

Kommunalitäten

	Anfänglich	Extraktion
LernenAR_LE1	1,000	0,738
LernenAR_LE2	1,000	0,867
LernenAR_LE3	1,000	0,588
LernenAR_LE4	1,000	0,715
LernenAR_LE5	1,000	0,719
LernenAR_LE6	1,000	0,604
LernenETM_LE1	1,000	0,704
LernenETM_LE2	1,000	0,685
LernenETM_LE3	1,000	0,412
LernenETM_LE5	1,000	0,528
LernenETM_LE4	1,000	0,607
LernenETM_LE6	1,000	0,409

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

Anhang

Erklärte Gesamtvarianz

Komponente	Anfängliche Eigenwerte			Summen von quadrierten Faktorladungen für Extraktion			Rotierte Summe der quadrierten Ladungen ^a
	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %	
1	5,223	43,529	43,529	5,223	43,529	43,529	4,803
2	2,352	19,599	63,128	2,352	19,599	63,128	3,194
3	0,949	7,906	71,035				
4	0,597	4,975	76,009				
5	0,535	4,460	80,470				
6	0,492	4,104	84,574				
7	0,482	4,017	88,591				
8	0,350	2,914	91,505				
9	0,331	2,761	94,266				
10	0,302	2,515	96,781				
11	0,250	2,081	98,862				
12	0,137	1,138	100,000				

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

a. Wenn Komponenten korreliert sind, können die Summen der quadrierten Ladungen nicht addiert werden, um eine

Komponentenmatrix^a

Komponente	Komponente	
	1	2
LernenAR_LE2	0,891	0,270
LernenAR_LE1	0,852	0,108
LernenAR_LE5	0,799	0,284
LernenAR_LE4	0,794	0,292
LernenETM_LE2	-0,736	0,379
LernenAR_LE6	0,691	0,356
LernenETM_LE1	-0,687	0,481
LernenAR_LE3	0,648	0,410
LernenETM_LE5	-0,527	0,500
LernenETM_LE4	-0,342	0,700
LernenETM_LE6		0,639
LernenETM_LE3	-0,359	0,532

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

a. 2 Komponenten extrahiert

Mustermatrix^a

Komponente	Komponente	
	1	2
LernenAR_LE2	0,910	
LernenAR_LE5	0,839	
LernenAR_LE4	0,839	
LernenAR_LE1	0,788	-0,230
LernenAR_LE6	0,786	
LernenAR_LE3	0,779	0,133
LernenETM_LE4		0,790
LernenETM_LE1	-0,322	0,719
LernenETM_LE5	-0,176	0,674
LernenETM_LE2	-0,420	0,642
LernenETM_LE3		0,639
LernenETM_LE6	0,353	0,600

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

a. Die Rotation ist in 6 Iterationen konvergiert.

Strukturmatrix

Komponente	Komponente	
	1	2
LernenAR_LE2	0,926	-0,256
LernenAR_LE5	0,847	-0,194
LernenAR_LE4	0,845	-0,184
LernenAR_LE1	0,829	-0,371
LernenAR_LE6	0,775	
LernenAR_LE3	0,755	
LernenETM_LE1	-0,451	0,777
LernenETM_LE4		0,774
LernenETM_LE2	-0,535	0,717
LernenETM_LE5	-0,296	0,705
LernenETM_LE3	-0,128	0,642
LernenETM_LE6	0,246	0,537

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

Komponentenkorrelationsmatrix

Komponente	1	2
1	1,000	-0,178
2	-0,178	1,000

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

ELU AR

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs Alpha	Cronbachs Alpha für standardisierte Items	Anzahl der Items
0,910	0,910	6

ELU EUM

Reliabilitätsstatistiken

Cronbachs Alpha	Cronbachs Alpha für standardisierte Items	Anzahl der Items
0,782	0,783	6

3.1.9 Konfirmatorische Faktorenanalyse 1: ELU

Estimator	DWLS
Optimization method	NLMINB
Number of model parameters	25

	Used	Total
Number of observations	338	629

Model Test User Model:

Test statistic	172.889
Degrees of freedom	53
P-value (Chi-square)	0.000

Model Test Baseline Model:

Test statistic	3281.899
Degrees of freedom	66
P-value	0.000

User Model versus Baseline Model:

Comparative Fit Index (CFI)	0.963
Tucker-Lewis Index (TLI)	0.954

Root Mean Square Error of Approximation:

RMSEA	0.082
90 Percent confidence interval - lower	0.069
90 Percent confidence interval - upper	0.096
P-value RMSEA <= 0.05	0.000

Standardized Root Mean Square Residual:

SRMR	0.093
------	-------

Parameter Estimates:

Standard errors	Standard
Information	Expected
Information saturated (h1) model	Unstructured

Latent Variables:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
AR =~						
LernenAR_LE1	1.000				2.796	0.865
LernenAR_LE2	0.991	0.053	18.622	0.000	2.772	0.936
LernenAR_LE3	0.691	0.041	16.660	0.000	1.933	0.689
LernenAR_LE4	0.913	0.050	18.311	0.000	2.552	0.841
LernenAR_LE5	0.858	0.047	18.165	0.000	2.399	0.852
LernenAR_LE6	0.746	0.044	17.010	0.000	2.085	0.694

Anhang

ETM =~

LernenETM_LE1	1.000			2.490	0.894		
LernenETM_LE2	0.994	0.074	13.376	0.000	2.475	0.867	
LernenETM_LE3	0.510	0.048	10.546	0.000	1.270	0.478	
LernenETM_LE4	0.545	0.050	10.800	0.000	1.358	0.483	
LernenETM_LE5	0.698	0.057	12.185	0.000	1.738	0.657	
LernenETM_LE6	0.199	0.038	5.183	0.000	0.495	0.178	

Covariances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
AR ~~						
ETM	-3.156	0.217	-14.576	0.000	-0.453	-0.453

Variances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
.LernenAR_LE1	2.628	0.784	3.352	0.001	2.628	0.252
.LernenAR_LE2	1.091	0.734	1.486	0.137	1.091	0.124
.LernenAR_LE3	4.137	0.589	7.018	0.000	4.137	0.525
.LernenAR_LE4	2.689	0.728	3.692	0.000	2.689	0.292
.LernenAR_LE5	2.167	0.646	3.355	0.001	2.167	0.273
.LernenAR_LE6	4.677	0.644	7.263	0.000	4.677	0.518
.LernenETM_LE1	1.564	0.773	2.023	0.043	1.564	0.201
.LernenETM_LE2	2.018	0.783	2.578	0.010	2.018	0.248
.LernenETM_LE3	5.433	0.548	9.907	0.000	5.433	0.771
.LernenETM_LE4	6.047	0.556	10.871	0.000	6.047	0.766
.LernenETM_LE5	3.972	0.584	6.799	0.000	3.972	0.568
.LernenETM_LE6	7.459	0.493	15.139	0.000	7.459	0.968
AR	7.819	0.565	13.828	0.000	1.000	1.000
ETM	6.201	0.601	10.320	0.000	1.000	1.000

R-Square:

	Estimate
LernenAR_LE1	0.748
LernenAR_LE2	0.876
LernenAR_LE3	0.475
LernenAR_LE4	0.708
LernenAR_LE5	0.727
LernenAR_LE6	0.482
LernenETM_LE1	0.799
LernenETM_LE2	0.752
LernenETM_LE3	0.229
LernenETM_LE4	0.234
LernenETM_LE5	0.432
LernenETM_LE6	0.032

Anhang

Modification Indices:

	lhs op	rhs	mi	epc	sepc.lv	sepc.all	sepc.nox
1	AR =~	LernenETM_LE1	14.885	-0.244	-0.681	-0.244	-0.244
2	AR =~	LernenETM_LE2	18.459	-0.273	-0.764	-0.268	-0.268
3	AR =~	LernenETM_LE3	18.778	0.204	0.572	0.215	0.215
4	AR =~	LernenETM_LE4	18.214	0.213	0.596	0.212	0.212
5	AR =~	LernenETM_LE5	0.000	-0.001	-0.002	-0.001	-0.001
6	AR =~	LernenETM_LE6	59.729	0.340	0.950	0.342	0.342
7	ETM =~	LernenAR_LE1	13.858	-0.283	-0.705	-0.218	-0.218
8	ETM =~	LernenAR_LE2	0.186	-0.032	-0.079	-0.027	-0.027
9	ETM =~	LernenAR_LE3	5.319	0.149	0.372	0.132	0.132
10	ETM =~	LernenAR_LE4	0.102	0.023	0.057	0.019	0.019
11	ETM =~	LernenAR_LE5	0.009	0.006	0.015	0.005	0.005
12	ETM =~	LernenAR_LE6	5.012	0.150	0.374	0.124	0.124
13	LernenAR_LE1 ~~	LernenAR_LE2	1.051	-0.738	-0.738	-0.436	-0.436
14	LernenAR_LE1 ~~	LernenAR_LE3	0.575	-0.488	-0.488	-0.148	-0.148
15	LernenAR_LE1 ~~	LernenAR_LE4	0.002	-0.031	-0.031	-0.012	-0.012
16	LernenAR_LE1 ~~	LernenAR_LE5	0.656	-0.539	-0.539	-0.226	-0.226
17	LernenAR_LE1 ~~	LernenAR_LE6	0.381	-0.413	-0.413	-0.118	-0.118
18	LernenAR_LE1 ~~	LernenETM_LE1	5.408	-1.344	-1.344	-0.663	-0.663
19	LernenAR_LE1 ~~	LernenETM_LE2	10.534	-1.969	-1.969	-0.855	-0.855
20	LernenAR_LE1 ~~	LernenETM_LE3	0.522	0.399	0.399	0.106	0.106
21	LernenAR_LE1 ~~	LernenETM_LE4	0.049	0.132	0.132	0.033	0.033
22	LernenAR_LE1 ~~	LernenETM_LE5	3.107	-1.011	-1.011	-0.313	-0.313
23	LernenAR_LE1 ~~	LernenETM_LE6	3.507	1.038	1.038	0.234	0.234
24	LernenAR_LE2 ~~	LernenAR_LE3	0.144	0.233	0.233	0.110	0.110
25	LernenAR_LE2 ~~	LernenAR_LE4	0.201	-0.302	-0.302	-0.176	-0.176
26	LernenAR_LE2 ~~	LernenAR_LE5	0.051	0.145	0.145	0.095	0.095
27	LernenAR_LE2 ~~	LernenAR_LE6	0.485	0.443	0.443	0.196	0.196
28	LernenAR_LE2 ~~	LernenETM_LE1	2.044	-0.804	-0.804	-0.616	-0.616
29	LernenAR_LE2 ~~	LernenETM_LE2	1.380	-0.677	-0.677	-0.457	-0.457
30	LernenAR_LE2 ~~	LernenETM_LE3	0.456	0.354	0.354	0.146	0.146
31	LernenAR_LE2 ~~	LernenETM_LE4	3.716	1.087	1.087	0.423	0.423
32	LernenAR_LE2 ~~	LernenETM_LE5	0.064	-0.142	-0.142	-0.068	-0.068
33	LernenAR_LE2 ~~	LernenETM_LE6	9.531	1.618	1.618	0.567	0.567
34	LernenAR_LE3 ~~	LernenAR_LE4	0.713	0.514	0.514	0.154	0.154
35	LernenAR_LE3 ~~	LernenAR_LE5	0.167	0.236	0.236	0.079	0.079
36	LernenAR_LE3 ~~	LernenAR_LE6	1.586	0.733	0.733	0.167	0.167
37	LernenAR_LE3 ~~	LernenETM_LE1	0.082	-0.145	-0.145	-0.057	-0.057
38	LernenAR_LE3 ~~	LernenETM_LE2	0.042	0.107	0.107	0.037	0.037
39	LernenAR_LE3 ~~	LernenETM_LE3	5.415	1.158	1.158	0.244	0.244
40	LernenAR_LE3 ~~	LernenETM_LE4	6.689	1.373	1.373	0.274	0.274
41	LernenAR_LE3 ~~	LernenETM_LE5	0.487	0.359	0.359	0.089	0.089
42	LernenAR_LE3 ~~	LernenETM_LE6	12.586	1.761	1.761	0.317	0.317
43	LernenAR_LE4 ~~	LernenAR_LE5	0.011	-0.067	-0.067	-0.028	-0.028
44	LernenAR_LE4 ~~	LernenAR_LE6	0.053	0.146	0.146	0.041	0.041
45	LernenAR_LE4 ~~	LernenETM_LE1	0.537	-0.401	-0.401	-0.195	-0.195
46	LernenAR_LE4 ~~	LernenETM_LE2	1.881	-0.781	-0.781	-0.335	-0.335
47	LernenAR_LE4 ~~	LernenETM_LE3	3.892	1.043	1.043	0.273	0.273

Anhang

48	LernenAR_LE4	~~	LernenETM_LE4	1.873	0.777	0.777	0.193	0.193
49	LernenAR_LE4	~~	LernenETM_LE5	0.128	0.198	0.198	0.060	0.060
50	LernenAR_LE4	~~	LernenETM_LE6	5.903	1.210	1.210	0.270	0.270
51	LernenAR_LE5	~~	LernenAR_LE6	0.271	0.313	0.313	0.098	0.098
52	LernenAR_LE5	~~	LernenETM_LE1	0.778	-0.449	-0.449	-0.244	-0.244
53	LernenAR_LE5	~~	LernenETM_LE2	1.403	-0.632	-0.632	-0.302	-0.302
54	LernenAR_LE5	~~	LernenETM_LE3	2.553	0.773	0.773	0.225	0.225
55	LernenAR_LE5	~~	LernenETM_LE4	1.877	0.709	0.709	0.196	0.196
56	LernenAR_LE5	~~	LernenETM_LE5	0.045	0.111	0.111	0.038	0.038
57	LernenAR_LE5	~~	LernenETM_LE6	4.097	1.006	1.006	0.250	0.250
58	LernenAR_LE6	~~	LernenETM_LE1	0.018	-0.070	-0.070	-0.026	-0.026
59	LernenAR_LE6	~~	LernenETM_LE2	0.061	0.136	0.136	0.044	0.044
60	LernenAR_LE6	~~	LernenETM_LE3	3.344	0.915	0.915	0.181	0.181
61	LernenAR_LE6	~~	LernenETM_LE4	2.433	0.844	0.844	0.159	0.159
62	LernenAR_LE6	~~	LernenETM_LE5	1.268	0.590	0.590	0.137	0.137
63	LernenAR_LE6	~~	LernenETM_LE6	18.317	2.205	2.205	0.373	0.373
64	LernenETM_LE1	~~	LernenETM_LE2	20.143	-3.547	-3.547	-1.997	-1.997
65	LernenETM_LE1	~~	LernenETM_LE3	0.301	0.322	0.322	0.110	0.110
66	LernenETM_LE1	~~	LernenETM_LE4	1.470	0.717	0.717	0.233	0.233
67	LernenETM_LE1	~~	LernenETM_LE5	1.216	-0.699	-0.699	-0.281	-0.281
68	LernenETM_LE1	~~	LernenETM_LE6	0.475	0.366	0.366	0.107	0.107
69	LernenETM_LE2	~~	LernenETM_LE3	3.911	1.174	1.174	0.355	0.355
70	LernenETM_LE2	~~	LernenETM_LE4	0.034	-0.109	-0.109	-0.031	-0.031
71	LernenETM_LE2	~~	LernenETM_LE5	1.652	-0.823	-0.823	-0.291	-0.291
72	LernenETM_LE2	~~	LernenETM_LE6	0.002	0.026	0.026	0.007	0.007
73	LernenETM_LE3	~~	LernenETM_LE4	1.370	0.606	0.606	0.106	0.106
74	LernenETM_LE3	~~	LernenETM_LE5	0.883	0.493	0.493	0.106	0.106
75	LernenETM_LE3	~~	LernenETM_LE6	3.237	0.811	0.811	0.127	0.127
76	LernenETM_LE4	~~	LernenETM_LE5	2.028	0.768	0.768	0.157	0.157
77	LernenETM_LE4	~~	LernenETM_LE6	33.107	2.914	2.914	0.434	0.434
78	LernenETM_LE5	~~	LernenETM_LE6	11.392	1.664	1.664	0.306	0.306

3.1.10 Konfirmatorische Faktorenanalyse 2: ELU

Estimator	DWLS
Optimization method	NLMINB
Number of model parameters	23

	Used	Total
Number of observations	346	629

Model Test User Model:

Test statistic	73.190
Degrees of freedom	43
P-value (Chi-square)	0.003

Model Test Baseline Model:

Test statistic	3221.501
Degrees of freedom	55
P-value	0.000

User Model versus Baseline Model:

Comparative Fit Index (CFI)	0.990
Tucker-Lewis Index (TLI)	0.988

Root Mean Square Error of Approximation:

RMSEA	0.045
90 Percent confidence interval - lower	0.026
90 Percent confidence interval - upper	0.062
P-value RMSEA <= 0.05	0.657

Standardized Root Mean Square Residual:

SRMR	0.065
------	-------

Parameter Estimates:

Standard errors	Standard
Information	Expected
Information saturated (h1) model	Unstructured

Latent Variables:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
AR = ~						
LernenAR_LE1	1.000		2.781	0.866		
LernenAR_LE2	0.992	0.053	18.889	0.000	2.759	0.937
LernenAR_LE3	0.683	0.041	16.783	0.000	1.899	0.682
LernenAR_LE4	0.913	0.049	18.560	0.000	2.538	0.840
LernenAR_LE5	0.856	0.047	18.398	0.000	2.382	0.848
LernenAR_LE6	0.748	0.043	17.272	0.000	2.080	0.697

Anhang

ETM =~

LernenETM_LE1	1.000			2.480	0.889		
LernenETM_LE2	0.996	0.074	13.521	0.000	2.469	0.866	
LernenETM_LE3	0.499	0.047	10.541	0.000	1.238	0.469	
LernenETM_LE4	0.526	0.049	10.680	0.000	1.305	0.465	
LernenETM_LE5	0.678	0.056	12.180	0.000	1.682	0.640	

Covariances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
AR ~~						
ETM	-3.291	0.220	-14.971	0.000	-0.477	-0.477

Variances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
.LernenAR_LE1	2.569	0.767	3.349	0.001	2.569	0.249
.LernenAR_LE2	1.057	0.719	1.469	0.142	1.057	0.122
.LernenAR_LE3	4.148	0.576	7.205	0.000	4.148	0.535
.LernenAR_LE4	2.678	0.711	3.765	0.000	2.678	0.294
.LernenAR_LE5	2.219	0.630	3.521	0.000	2.219	0.281
.LernenAR_LE6	4.584	0.631	7.266	0.000	4.584	0.515
.LernenETM_LE1	1.637	0.763	2.146	0.032	1.637	0.210
.LernenETM_LE2	2.037	0.772	2.638	0.008	2.037	0.250
.LernenETM_LE3	5.425	0.538	10.084	0.000	5.425	0.780
.LernenETM_LE4	6.183	0.539	11.466	0.000	6.183	0.784
.LernenETM_LE5	4.084	0.565	7.224	0.000	4.084	0.591
AR	7.735	0.552	14.021	0.000	1.000	1.000
ETM	6.152	0.592	10.392	0.000	1.000	1.000

R-Square:

	Estimate
LernenAR_LE1	0.751
LernenAR_LE2	0.878
LernenAR_LE3	0.465
LernenAR_LE4	0.706
LernenAR_LE5	0.719
LernenAR_LE6	0.485
LernenETM_LE1	0.790
LernenETM_LE2	0.750
LernenETM_LE3	0.220
LernenETM_LE4	0.216
LernenETM_LE5	0.409

Anhang

Modification Indices:

	lhs op	rhs	mi	epc	sepc.lv	sepc.all	sepc.nox
1	AR =~	LernenETM_LE1	8.637	-0.200	-0.557	-0.200	-0.200
2	AR =~	LernenETM_LE2	10.742	-0.225	-0.625	-0.219	-0.219
3	AR =~	LernenETM_LE3	21.673	0.229	0.636	0.241	0.241
4	AR =~	LernenETM_LE4	17.202	0.215	0.599	0.213	0.213
5	AR =~	LernenETM_LE5	0.014	0.006	0.018	0.007	0.007
6	ETM =~	LernenAR_LE1	12.850	-0.283	-0.703	-0.219	-0.219
7	ETM =~	LernenAR_LE2	0.207	-0.035	-0.086	-0.029	-0.029
8	ETM =~	LernenAR_LE3	4.122	0.136	0.337	0.121	0.121
9	ETM =~	LernenAR_LE4	0.164	0.030	0.075	0.025	0.025
10	ETM =~	LernenAR_LE5	0.131	0.025	0.063	0.022	0.022
11	ETM =~	LernenAR_LE6	3.877	0.137	0.340	0.114	0.114
12	LernenAR_LE1 ~~	LernenAR_LE2	1.108	-0.741	-0.741	-0.450	-0.450
13	LernenAR_LE1 ~~	LernenAR_LE3	0.598	-0.485	-0.485	-0.149	-0.149
14	LernenAR_LE1 ~~	LernenAR_LE4	0.000	-0.014	-0.014	-0.005	-0.005
15	LernenAR_LE1 ~~	LernenAR_LE5	0.548	-0.481	-0.481	-0.202	-0.202
16	LernenAR_LE1 ~~	LernenAR_LE6	0.417	-0.423	-0.423	-0.123	-0.123
17	LernenAR_LE1 ~~	LernenETM_LE1	4.084	-1.156	-1.156	-0.564	-0.564
18	LernenAR_LE1 ~~	LernenETM_LE2	8.463	-1.742	-1.742	-0.762	-0.762
19	LernenAR_LE1 ~~	LernenETM_LE3	0.682	0.447	0.447	0.120	0.120
20	LernenAR_LE1 ~~	LernenETM_LE4	0.021	0.086	0.086	0.021	0.021
21	LernenAR_LE1 ~~	LernenETM_LE5	2.969	-0.971	-0.971	-0.300	-0.300
22	LernenAR_LE2 ~~	LernenAR_LE3	0.109	0.198	0.198	0.094	0.094
23	LernenAR_LE2 ~~	LernenAR_LE4	0.164	-0.267	-0.267	-0.159	-0.159
24	LernenAR_LE2 ~~	LernenAR_LE5	0.078	0.175	0.175	0.114	0.114
25	LernenAR_LE2 ~~	LernenAR_LE6	0.407	0.397	0.397	0.180	0.180
26	LernenAR_LE2 ~~	LernenETM_LE1	1.275	-0.629	-0.629	-0.478	-0.478
27	LernenAR_LE2 ~~	LernenETM_LE2	0.688	-0.472	-0.472	-0.322	-0.322
28	LernenAR_LE2 ~~	LernenETM_LE3	0.560	0.385	0.385	0.161	0.161
29	LernenAR_LE2 ~~	LernenETM_LE4	3.334	1.013	1.013	0.396	0.396
30	LernenAR_LE2 ~~	LernenETM_LE5	0.035	-0.102	-0.102	-0.049	-0.049
31	LernenAR_LE3 ~~	LernenAR_LE4	0.580	0.454	0.454	0.136	0.136
32	LernenAR_LE3 ~~	LernenAR_LE5	0.162	0.227	0.227	0.075	0.075
33	LernenAR_LE3 ~~	LernenAR_LE6	1.523	0.702	0.702	0.161	0.161
34	LernenAR_LE3 ~~	LernenETM_LE1	0.029	-0.085	-0.085	-0.033	-0.033
35	LernenAR_LE3 ~~	LernenETM_LE2	0.121	0.179	0.179	0.061	0.061
36	LernenAR_LE3 ~~	LernenETM_LE3	5.417	1.133	1.133	0.239	0.239
37	LernenAR_LE3 ~~	LernenETM_LE4	7.024	1.379	1.379	0.272	0.272
38	LernenAR_LE3 ~~	LernenETM_LE5	0.532	0.368	0.368	0.089	0.089
39	LernenAR_LE4 ~~	LernenAR_LE5	0.000	0.012	0.012	0.005	0.005
40	LernenAR_LE4 ~~	LernenAR_LE6	0.035	0.115	0.115	0.033	0.033
41	LernenAR_LE4 ~~	LernenETM_LE1	0.170	-0.224	-0.224	-0.107	-0.107
42	LernenAR_LE4 ~~	LernenETM_LE2	1.026	-0.569	-0.569	-0.244	-0.244
43	LernenAR_LE4 ~~	LernenETM_LE3	4.291	1.073	1.073	0.282	0.282
44	LernenAR_LE4 ~~	LernenETM_LE4	1.617	0.709	0.709	0.174	0.174
45	LernenAR_LE4 ~~	LernenETM_LE5	0.165	0.221	0.221	0.067	0.067
46	LernenAR_LE5 ~~	LernenAR_LE6	0.261	0.300	0.300	0.094	0.094
47	LernenAR_LE5 ~~	LernenETM_LE1	0.247	-0.251	-0.251	-0.132	-0.132

Anhang

48	LernenAR_LE5	~~	LernenETM_LE2	0.542	-0.389	-0.389	-0.183	-0.183
49	LernenAR_LE5	~~	LernenETM_LE3	2.984	0.821	0.821	0.237	0.237
50	LernenAR_LE5	~~	LernenETM_LE4	1.729	0.672	0.672	0.181	0.181
51	LernenAR_LE5	~~	LernenETM_LE5	0.051	0.116	0.116	0.039	0.039
52	LernenAR_LE6	~~	LernenETM_LE1	0.004	0.034	0.034	0.012	0.012
53	LernenAR_LE6	~~	LernenETM_LE2	0.240	0.266	0.266	0.087	0.087
54	LernenAR_LE6	~~	LernenETM_LE3	3.523	0.919	0.919	0.184	0.184
55	LernenAR_LE6	~~	LernenETM_LE4	2.211	0.793	0.793	0.149	0.149
56	LernenAR_LE6	~~	LernenETM_LE5	1.374	0.602	0.602	0.139	0.139
57	LernenETM_LE1	~~	LernenETM_LE2	18.030	-3.336	-3.336	-1.827	-1.827
58	LernenETM_LE1	~~	LernenETM_LE3	0.779	0.506	0.506	0.170	0.170
59	LernenETM_LE1	~~	LernenETM_LE4	2.827	0.974	0.974	0.306	0.306
60	LernenETM_LE1	~~	LernenETM_LE5	0.500	-0.437	-0.437	-0.169	-0.169
61	LernenETM_LE2	~~	LernenETM_LE3	5.119	1.316	1.316	0.396	0.396
62	LernenETM_LE2	~~	LernenETM_LE4	0.079	0.164	0.164	0.046	0.046
63	LernenETM_LE2	~~	LernenETM_LE5	0.978	-0.617	-0.617	-0.214	-0.214
64	LernenETM_LE3	~~	LernenETM_LE4	2.186	0.746	0.746	0.129	0.129
65	LernenETM_LE3	~~	LernenETM_LE5	1.333	0.590	0.590	0.125	0.125
66	LernenETM_LE4	~~	LernenETM_LE5	3.176	0.935	0.935	0.186	0.186

3.1.11 Reliabilität HoloBrain: ARI

Dimension	Engagement		Inanspruchnahme		Totale Immersion	
	α	entfernte Items	α	entfernte Items	α	entfernte Items
3D QR-Cube	.66	a6	.79	b5, b6	.67	
2D Gehirnscheibe	.75	a5	.56	b5, b6	.71	
AR-Hirnmodell	.70		.59	b6	.71	
Papiermodell	.81	a6	.63	b5	.81	

3.1.12 Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung: ARI

Dimension	Trigger	Shapiro-Wilk		
		Statistik	df	p
Engagement	3D QR-Cube	.904	31	.009
	2D Gehirnscheibe	.949	30	.160 ^a
Inanspruchnahme	3D QR-Cube	.887	31	.003
	2D Gehirnscheibe	.957	30	.266 ^a
Totale Immersion	3D QR-Cube	.942	31	.094 ^a
	2D Gehirnscheibe	.938	30	.080 ^a

^a Normalverteilung liegt vor

3.2 Ergebnistabellen

3.2.1 Mittelwertvergleich: Kognitive Leistungstest (t-Test)

Ebene	Test	Medium	N	M	SD	r	T	df	p	CI	CI	Cohens d
beide UE	Pre	AR	356	9,65	11,42	0,61	-1,30	355	0,195	-1,57	0,32	-0,14
		EUM	356	10,28	12,48	0,66						
	Post*	AR	353	55,99	20,16	1,07	2,69	352	0,008	0,97	6,26	0,29
		EUM	353	52,37	21,31	1,13						
	LZ	AR	353	50,82	22,88	1,22	3,55	352	0,000	2,39	8,35	0,38
		EUM	353	45,45	26,23	1,40						
Aufbau Gehirn	Pre	AR	356	16,00	19,92	1,06	-0,90	355	0,366	-4,24	1,57	-0,10
		EUM	356	17,34	20,30	1,08						
	Post	AR	343	55,66	23,95	1,29	2,67	342	0,008	1,32	8,72	0,29
		EUM	343	50,64	26,07	1,41						
	LZ	AR	343	44,69	32,84	1,77	2,28	342	0,023	0,75	10,11	0,25
		EUM	343	39,26	33,10	1,79						
Pathologie AD	Pre	AR	303	0,79	5,99	0,34	-1,70	302	0,089	-2,14	0,15	-0,20
		EUM	303	1,79	8,12	0,47						
	Post	AR	262	61,21	27,48	1,70	0,42	261	0,674	-3,30	5,10	0,05
		EUM	262	60,31	26,48	1,64						
	LZ	AR	262	60,35	29,48	1,82	0,51	261	0,613	-3,23	5,47	0,06
		EUM	262	59,23	27,41	1,69						
1	Pre	AR	171	10,01	13,05	1,00	-1,58	354	0,115	-5,43	0,59	-0,17
		EUM	185	12,43	15,61	1,15						
	Post	AR	164	61,28	20,73	1,62	2,59	341	0,010	1,43	10,52	0,28
		EUM	179	55,31	21,93	1,64						
	LZ	AR	164	57,31	21,67	1,69	3,25	341	0,001	3,15	12,77	0,35
		EUM	179	49,34	23,48	1,75						
3	Pre	AR	185	32,70	44,52	3,27	-0,74	354	0,459	-13,00	5,89	-0,08
		EUM	171	36,26	46,03	3,52						
	Post	AR	179	73,74	39,42	2,95	-0,15	341	0,878	-8,94	7,65	-0,02
		EUM	164	74,39	38,57	3,01						
	LZ	AR	128	66,02	47,34	4,18	-0,39	238	0,696	-13,79	9,21	-0,05
		EUM	112	68,30	42,45	4,01						
4	Pre	AR	185	10,81	15,84	1,16	-1,34	354	0,180	-5,54	1,04	-0,14
		EUM	171	13,06	15,71	1,20						
	Post	AR	179	51,86	30,08	2,25	-1,61	341	0,107	-11,43	1,13	-0,17
		EUM	164	57,01	28,90	2,26						
	LZ	AR	179	46,94	49,91	3,72	0,22	345,00	0,83	-9,15	11,43	0,02
		EUM	164	45,81	47,34	3,66						
5	Pre	AR	171	9,14	12,71	0,97	0,31	354	0,753	-2,21	3,05	0,03
		EUM	185	8,72	12,54	0,92						
	Post	AR	164	34,45	23,30	1,82	6,90	341	0,000	11,50	20,67	0,75
		EUM	179	18,37	19,84	1,48						
	LZ	AR	164	26,73	26,90	2,10	6,32	341	0,000	12,38	23,57	0,68
		EUM	179	8,75	25,77	1,93						
6	Pre	AR	159	0,63	5,59	0,44	-0,47	301	0,636	-2,13	1,30	-0,05
		EUM	144	1,04	9,29	0,77						
	Post	AR	136	65,07	46,08	3,95	0,62	260	0,538	-7,81	14,94	0,08
		EUM	126	61,51	47,40	4,22						
	LZ	AR	136	65,07	46,08	3,95	0,53	259	0,595	-8,31	14,46	0,07
		EUM	125	62,00	47,26	4,23						
7	Pre	AR	144	1,27	8,15	0,88	-1,57	296,515	0,116	-3,74	0,42	-0,18
		EUM	159	2,94	10,19	0,81						
	Post	AR	126	70,11	23,51	2,09	1,81	260	0,072	-0,47	10,78	0,22
		EUM	136	64,95	22,71	1,95						
	LZ	AR	126	68,44	28,52	2,54	1,56	260	0,121	-1,33	11,37	0,19
		EUM	136	63,42	23,59	2,02						
8	Pre	AR	159	0,09	1,13	0,09	0,95	301	0,342	-0,10	0,28	0,11
		EUM	144	0,00	0,00	0,00						
	Post	AR	136	40,86	24,60	2,11	-2,53	250,258	0,012	-14,64	-1,83	-0,32
		EUM	126	49,09	27,79	2,48						
	LZ	AR	136	40,74	24,85	2,13	-2,56	251,161	0,011	-14,79	-1,92	-0,32
		EUM	126	49,09	27,79	2,48						
UE: Mitochondrien und Chloroplasten	Pre	AR	119	37,09	23,63	2,17	0,49	118	0,628	-3,14	5,183	0,09
		Touch	119	36,07	21,06	1,93						
	Post	AR	124	55,36	25,53	2,29	-1,28	123	0,202	-6,49	1,387	-0,23
		Touch	124	57,91	20,97	1,88						
	LZ	AR	108	25,50	37,09	3,59	-0,20	106,00	0,84	-9,39	7,69	-0,04
		Touch	108	26,35	45,66	4,41						
9	Pre	AR	63	29,76	18,707	2,36	-0,18	119	0,860	-7,62	6,37	-0,03
		Touch	58	30,39	20,157	2,65						
	Post	AR	62	46,17	24,752	3,14	-2,29	120	0,024	-17,62	-1,29	-0,42
		Touch	60	55,63	20,511	2,65						
	LZ	AR	58	19,53	36,40	4,78	-2,13	109,00	0,04	-27,06	-0,97	-0,41
		Touch	53	33,54	32,58	4,47						
10	Pre	AR	63	45,58	25,25	3,18	0,81	120,980	0,418	-4,88	11,68	0,15
		Touch	63	42,18	21,53	2,71						
	Post	AR	63	65,76	22,45	2,83	1,22	124	0,225	-2,96	12,49	0,22
		Touch	63	61,00	21,34	2,69						
	LZ	AR	59	32,56	39,19	5,10	-1,00	117,00	0,32	-25,70	8,41	-0,19
		Touch	60	23,91	53,51	6,91						
HoloBrain	11 Pre	QR-Cube	31	63,87	28,60	5,14	0,55	59,00	0,58	-11,07	19,48	0,14
		Gehirnscheibe	30	59,67	31,02	5,66						
	Post	QR-Cube	31	88,71	17,08	3,07	1,18	59,00	0,24	-4,00	15,42	0,31
		Gehirnscheibe	30	83,00	20,70	3,78						
	LZ	QR-Cube	31	50,65	46,17	8,29	1,08	59,00	0,28	-17,22	57,90	0,28
		Gehirnscheibe	30	30,30	93,41	17,05						

3.2.2 Mittelwertvergleich: Cognitive Load (t-Test)

Load	Medium	N	M	SD	r	T	df	p	CI	CI	Cohens d
CL	AR	358	4,46	1,37	0,07	0,72	357,00	0,47	-0,08	0,18	0,08
	EUM	358	4,41	1,43	0,08						
ICL	AR	358	2,63	1,30	0,07	-0,55	357,00	0,58	-0,14	0,08	-0,06
	EUM	358	2,66	1,36	0,07						
ECL	AR	357	2,21	1,29	0,07	0,57	356,00	0,57	-0,08	0,15	0,06
	EUM	357	2,17	1,28	0,07						
GCL	AR	360	6,79	1,76	0,09	0,51	359,00	0,61	-0,11	0,18	0,05
	EUM	360	6,75	1,72	0,09						
CL	AR	350	4,50	1,48	0,08	1,19	349,00	0,23	-0,07	0,29	0,13
	EUM	350	4,40	1,58	0,08						
ICL	AR	349	2,68	1,41	0,08	0,40	348,00	0,69	-0,12	0,18	0,04
	EUM	349	2,65	1,47	0,08						
ECL	AR	344	2,21	1,35	0,07	1,11	343,00	0,27	-0,06	0,23	0,12
	EUM	344	2,13	1,38	0,07						
GCL	AR	350	6,78	1,87	0,10	0,19	349,00	0,85	-0,17	0,20	0,02
	EUM	350	6,76	1,85	0,10						
CL	AR	238	4,47	1,78	0,12	0,53	237,00	0,60	-0,17	0,30	0,07
	EUM	238	4,41	1,71	0,11						
ICL	AR	240	2,54	1,54	0,10	-0,18	239,00	0,86	-0,21	0,18	-0,02
	EUM	240	2,56	1,64	0,11						
ECL	AR	235	2,11	1,47	0,10	0,34	234,00	0,73	-0,14	0,20	0,05
	EUM	235	2,08	1,56	0,10						
GCL	AR	241	6,90	1,99	0,13	2,15	240,00	0,03	0,02	0,38	0,28
	EUM	241	6,70	2,12	0,14						
1 CL	AR	174	4,06	1,52	0,12	0,73	356,00	0,47	-0,21	0,46	0,08
	EUM	184	3,94	1,68	0,12						
ICL	AR	176	2,35	1,42	0,11	-1,57	359,00	0,12	-0,56	0,06	-0,17
	EUM	185	2,60	1,60	0,12						
ECL	AR	175	2,03	1,29	0,10	-0,12	354,01	0,90	-0,31	0,27	-0,01
	EUM	185	2,05	1,52	0,11						
GCL	AR	176	7,24	1,80	0,14	0,39	359,00	0,70	-0,30	0,44	0,04
	EUM	185	7,17	1,78	0,13						
3 CL	AR	175	4,36	1,79	0,14	-0,27	325,51	0,79	-0,46	0,35	-0,03
	EUM	163	4,42	2,00	0,16						
ICL	AR	178	2,74	1,84	0,14	0,25	340,00	0,80	-0,33	0,43	0,03
	EUM	164	2,69	1,70	0,13						
ECL	AR	178	2,37	1,75	0,13	-0,36	340,00	0,72	-0,43	0,30	-0,04
	EUM	164	2,44	1,70	0,13						
GCL	AR	178	6,24	2,35	0,18	-0,48	340,00	0,63	-0,61	0,37	-0,05
	EUM	164	6,36	2,23	0,17						
4 CL	AR	173	5,02	1,82	0,14	-1,36	325,00	0,17	-0,67	0,12	-0,15
	EUM	154	5,29	1,79	0,14						
ICL	AR	176	3,18	1,73	0,13	-1,09	331,00	0,28	-0,58	0,17	-0,12
	EUM	157	3,39	1,75	0,14						
ECL	AR	175	2,44	1,75	0,13	-1,53	330,00	0,13	-0,65	0,08	-0,17
	EUM	157	2,72	1,63	0,13						
GCL	AR	175	6,36	2,09	0,16	0,34	329,00	0,73	-0,37	0,53	0,04
	EUM	156	6,28	2,07	0,17						
5 CL	AR	170	4,61	1,73	0,13	3,11	338,00	0,00	0,22	0,97	0,34
	EUM	170	4,02	1,79	0,14						
ICL	AR	170	2,43	1,44	0,11	3,39	341,00	0,00	0,22	0,82	0,37
	EUM	173	1,91	1,39	0,11						
ECL	AR	170	1,94	1,40	0,11	3,26	341,00	0,00	0,19	0,76	0,35
	EUM	173	1,46	1,27	0,10						
GCL	AR	169	7,40	1,95	0,15	0,89	341,00	0,37	-0,23	0,60	0,10
	EUM	174	7,21	1,95	0,15						
6 CL	AR	125	3,50	1,71	0,15	-3,89	245,00	0,00	-1,23	-0,40	-0,50
	EUM	122	4,32	1,58	0,14						
ICL	AR	126	1,81	1,38	0,12	-3,19	247,00	0,00	-0,92	-0,22	-0,41
	EUM	123	2,37	1,43	0,13						
ECL	AR	126	1,91	1,51	0,13	-1,12	246,00	0,27	-0,58	0,16	-0,14
	EUM	122	2,12	1,43	0,13						
GCL	AR	125	6,70	2,07	0,18	0,30	246,00	0,77	-0,45	0,61	0,04
	EUM	123	6,62	2,20	0,20						
7 CL	AR	118	5,08	1,76	0,16	2,40	238,00	0,02	0,10	1,03	0,31
	EUM	122	4,51	1,90	0,17						
ICL	AR	119	3,12	1,53	0,14	1,72	229,24	0,09	-0,06	0,84	0,23
	EUM	123	2,73	1,97	0,18						
ECL	AR	119	2,37	1,46	0,13	-0,39	222,33	0,70	-0,54	0,36	-0,05
	EUM	124	2,46	2,06	0,18						
GCL	AR	120	6,87	2,13	0,19	1,61	241,00	0,11	-0,10	1,04	0,21
	EUM	123	6,41	2,37	0,21						
8 CL	AR	126	4,10	1,71	0,15	-2,57	238,00	0,01	-0,95	-0,13	-0,33
	EUM	114	4,64	1,52	0,14						
ICL	AR	127	2,11	1,52	0,14	-2,81	241,00	0,01	-0,95	-0,17	-0,36
	EUM	116	2,67	1,58	0,15						
ECL	AR	127	1,77	1,48	0,13	0,20	240,00	0,84	-0,32	0,39	0,03
	EUM	115	1,73	1,30	0,12						
GCL	AR	127	7,06	2,13	0,19	-1,21	241,00	0,23	-0,81	0,19	-0,16
	EUM	116	7,37	1,83	0,17						

Anhang

UE:Mitochondrien und Chloroplasten	CL	AR	107	4,77	1,86	0,18	0,322	106	0,748	-0,268	0,372	0,06	
		Touch	107	4,71	1,82	0,18							
	ICL	AR	118	2,94	1,82	0,17	-0,476	117	0,635	-0,366	0,224	-0,09	
		Touch	118	3,01	1,83	0,17							
	ECL	AR	118	2,29	1,65	0,15	-1,078	117	0,283	-0,410	0,121	-0,20	
		Touch	118	2,43	1,64	0,15							
	GCL	AR	116	7,29	1,99	0,18	1,418	115	0,159	-0,117	0,704	0,26	
		Touch	116	6,99	2,16	0,20							
	9	CL	AR	65	4,91	1,68	0,21	0,64	124,00	0,52	-0,43	0,84	0,12
		Touch	61	4,70	1,92	0,25							
		ICL	AR	67	3,10	1,69	0,21	-0,50	130,00	0,62	-0,78	0,47	-0,09
		Touch	65	3,26	1,93	0,24							
	ECL	AR	67	2,40	1,54	0,19	-0,68	130,00	0,49	-0,73	0,35	-0,12	
	Touch	65	2,58	1,60	0,20								
	GCL	AR	67	7,18	2,04	0,25	0,88	130,00	0,38	-0,40	1,05	0,15	
	Touch	65	6,86	2,18	0,27								
10	CL	AR	59	4,60	1,92	0,25	-0,37	109,00	0,71	-0,81	0,56	-0,07	
	Touch	52	4,72	1,69	0,23								
	ICL	AR	67	2,68	1,91	0,23	-0,08	118,00	0,94	-0,68	0,63	-0,01	
	Touch	53	2,71	1,66	0,23								
	ECL	AR	67	2,18	1,71	0,21	-0,23	118,00	0,82	-0,69	0,55	-0,04	
	Touch	53	2,25	1,68	0,23								
	GCL	AR	67	7,34	2,01	0,25	0,59	118,00	0,55	-0,55	1,01	0,11	
	Touch	53	7,11	2,29	0,31								
HoloBrain	1 ICL	QR-Cube	13	2,00	1,06	0,29	-2,99	26,00	0,01	-2,66	-0,49	-1,17	
		Gehirnscheibe	15	3,58	1,63	0,42							
	ECL	QR-Cube	13	2,54	1,52	0,42	-0,98	26,00	0,33	-1,68	0,59	-0,39	
		Gehirnscheibe	15	3,08	1,41	0,36							
	GCL	QR-Cube	13	6,94	2,43	0,67	0,44	26,00	0,67	-1,27	1,95	0,17	
		Gehirnscheibe	15	6,60	1,69	0,44							

3.2.3 Mittelwertvergleich: Cognitive Loads (Mann-Whitney-U & Wilcoxon)

Load	Gruppe	N	Mdn	SD	MRang	U	Z	p	η^2
ICL	QR-Cube	13	1,66	1,06	10,15	41,00	-2,62	0,01	0,25
	Gehirnscheibe	15	3,66	1,63	18,27				
ECL	QR-Cube	13	2,00	1,52	13,12	79,50	-0,83	0,42	0,02
	Gehirnscheibe	15	3,75	1,41	15,70				
GCL	QR-Cube	13	8,00	2,43	16,04	77,50	-0,92	0,37	0,03
	Gehirnscheibe	15	6,75	1,69	13,17				
ICL	AR	28	2,50	1,59	12,27	*	-1,53	0,13	0,04
	Papiermodell	27	3,00	2,24	8,94				
ECL	AR	28	3,13	1,46	12,18	*	-2,10	0,04	0,08
	Papiermodell	27	3,25	1,82	11,50				
GCL	AR	28	7,00	2,03	9,08	*	-2,73	0,01	0,14
	Papiermodell	27	7,00	2,14	13,64				

* es handelt sich um den Wilcoxon-Test verbundener Stichproben (daher kein U)

3.2.4 Mittelwertvergleich: UEQ (t-Test)

UEQ-Dimension	Lernsetting	N	M	SD	r	T	df	p	CI	CI	Cohens d
Attraktivität	9	107	1,78	0,78	0,08	-2,39	106	0,02	-0,33	-0,03	-0,46
	10	107	1,96	0,96	0,09						
Durchschaubarkeit	9	109	1,63	1,10	0,11	-1,74	108	0,08	-0,39	0,03	-0,33
	10	109	1,82	1,08	0,10						
Effizienz	9	109	1,35	0,88	0,08	-2,31	108	0,02	-0,41	-0,03	-0,44
	10	109	1,57	0,97	0,09						
Steuerbarkeit	9	109	1,53	0,95	0,09	-0,58	108	0,56	-0,27	0,15	-0,11
	10	109	1,59	1,07	0,10						
Stimulation	9	109	1,63	0,92	0,09	-4,67	108	0,00	-0,55	-0,22	-0,90
	10	109	2,01	0,92	0,09						
Originalität	9	109	1,49	0,99	0,10	-3,49	108	0,00	-0,49	-0,13	-0,67
	10	109	1,80	0,94	0,09						

UEQ-Dimension	Trigger	N	M	SD	r	T	df	p	CI	CI	Cohens d
Attraktivität	QR-Cube	10	1,69	0,38	0,12	-1,47	21,00	0,16	-0,66	0,11	-0,62
	Gehirnscheibe	13	1,96	0,48	0,13	-1,52					
Durchschaubarkeit	QR-Cube	11	1,64	0,96	0,29	0,29	23,00	0,77	-0,62	0,82	0,12
	Gehirnscheibe	14	1,54	0,77	0,21	0,28					
Effizienz	QR-Cube	11	1,42	0,76	0,23	1,44	23,00	0,16	-0,18	1,03	0,58
	Gehirnscheibe	14	1,00	0,70	0,19	1,43					
Steuerbarkeit	QR-Cube	11	1,36	0,69	0,21	-0,13	23,00	0,90	-0,69	0,61	-0,05
	Gehirnscheibe	14	1,40	0,85	0,23	-0,13					
Stimulation	QR-Cube	11	1,75	0,99	0,30	-0,37	23,00	0,71	-0,82	0,57	-0,15
	Gehirnscheibe	14	1,88	0,70	0,19	-0,36					
Originalität	QR-Cube	11	1,33	1,18	0,36	-1,42	23,00	0,17	-1,29	0,24	-0,57
	Gehirnscheibe	14	1,86	0,64	0,17	-1,33					

UEQ-Dimension	mediale		N	M	SD	r	T	df	p	CI	CI	Cohens d
	Repräsentation											
Attraktivität	AR	23	1,84	0,45	0,09	7,91	22	0,00	1,04	1,78	3,37	
	Papiermodell	23	0,43	0,85	0,18							
Durchschaubarkeit	AR	25	1,58	0,84	0,17	2,89	24	0,01	0,28	1,67	1,18	
	Papiermodell	25	0,61	1,41	0,28							
Effizienz	AR	25	1,19	0,75	0,15	3,25	24	0,00	0,36	1,61	1,33	
	Papiermodell	25	0,20	1,13	0,23							
Steuerbarkeit	AR	25	1,39	0,77	0,15	1,73	24	0,10	-0,08	0,88	0,71	
	Papiermodell	25	0,99	0,91	0,18							
Stimulation	AR	25	1,82	0,82	0,16	5,45	24	0,00	1,04	2,32	2,23	
	Papiermodell	25	0,14	1,27	0,25							
Originalität	AR	25	1,63	0,93	0,19	7,03	24	0,00	1,71	3,14	2,87	
	Papiermodell	25	-0,80	1,35	0,27							

3.2.5 Mittelwertvergleich: ELU (t-Test)

Untersuchung	Paar	N	M	SD	r	T	df	p	CI	CI	Cohens d
Medium	AR	336	5,49	2,34	0,13	-2,31	335	0,02	-0,86	-0,07	-0,25
	EUM	336	5,96	2,03	0,11						
Steuerung	AR	123	6,57	1,85	0,17	5,68	122	0,00	0,98	2,04	1,03
	Touch	123	5,06	2,03	0,18						

3.2.6 Mittelwertvergleich: ARI (t-Test)

Dimension	Gruppe	N	M	SD	r	T	df	p	CI	CI	Cohens d
Engagement	QR-Cube	31	4,06	0,45	0,08	-0,02	59	0,99	-0,23	0,22	0,00
	Gehirnscheibe	30	4,06	0,42	0,08						
Inanspruchnahme	QR-Cube	31	3,06	0,44	0,08	-1,88	59	0,06	-0,42	0,01	-0,49
	Gehirnscheibe	30	3,27	0,40	0,07						
totale Immersion	QR-Cube	31	3,33	0,46	0,08	-2,12	59	0,04	-0,50	-0,01	-0,55
	Gehirnscheibe	30	3,59	0,50	0,09						
Engagement	AR	61	4,06	0,43	0,06	11,67	60	0,00	0,87	1,24	3,01
	Papiermodell	61	3,01	0,62	0,08						
Inanspruchnahme	AR	61	3,16	0,43	0,05	5,19	60	0,00	0,26	0,58	1,34
	Papiermodell	61	2,75	0,59	0,08						
totale Immersion	AR	61	3,46	0,49	0,06	11,59	60	0,00	0,86	1,21	2,99
	Papiermodell	61	2,42	0,58	0,07						

3.2.7 Mittelwertvergleich: ARI (Mann-Whitney-U & Wilcoxon)

Dimension	Gruppe	N	Mdn	SD	MRang	U	Z	p	η^2
Engagement	QR-Cube	31	4,13	0,45	31,44	451,50	-0,20	0,84	0,00
	Gehirnscheibe	30	4,13	0,42	30,55				
Inanspruchnahme	QR-Cube	31	3,20	0,44	27,24	348,50	-1,71	0,09	0,05
	Gehirnscheibe	30	3,40	0,40	34,88				
totale Immersion	QR-Cube	31	3,43	0,46	26,87	337,00	-1,86	0,06	0,06
	Gehirnscheibe	30	3,71	0,50	35,27				
Engagement	AR	61	4,13	0,43	33,12	*	-6,53	0,00	0,70
	Papiermodell	61	3,00	0,62	7,30				
Inanspruchnahme	AR	61	3,20	0,43	31,14	*	-4,44	0,00	0,16
	Papiermodell	61	2,80	0,59	15,46				
totale Immersion	AR	61	3,43	0,49	31,82	*	-6,62	0,00	0,36
	Papiermodell	61	2,43	0,58	5,33				

* es handelt sich um den Wilcoxon-Test verbundener Stichproben (daher kein U)

3.2.8 Strukturgleichungsmodell CLT und LZ

Estimator	DWLS
Optimization method	NLMINB
Number of model parameters	31

	Used	Total
Number of observations	407	629

Model Test User Model:

Test statistic	80.079
Degrees of freedom	74
P-value (Chi-square)	0.294

Model Test Baseline Model:

Test statistic	4000.508
Degrees of freedom	91
P-value	0.000

User Model versus Baseline Model:

Comparative Fit Index (CFI)	0.998
Tucker-Lewis Index (TLI)	0.998

Root Mean Square Error of Approximation:

RMSEA	0.014
90 Percent confidence interval - lower	0.000
90 Percent confidence interval - upper	0.033
P-value RMSEA <= 0.05	1.000

Standardized Root Mean Square Residual:

SRMR	0.054
------	-------

Parameter Estimates:

Standard errors	Standard
Information	Expected
Information saturated (h1) model	Unstructured

Latent Variables:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
ICL =~						
A5_CL1I1L1	1.000		1.970	0.878		
A5_CL1I1L2	0.721	0.048	15.048	0.000	1.420	0.605
A5_CL1I1L3	0.955	0.058	16.369	0.000	1.882	0.837
A5_SA1	0.588	0.038	15.596	0.000	1.159	0.721

Anhang

ECL =~						
A5_CL1EL1	1.000			1.599	0.697	
A5_CL1EL2	1.243	0.074	16.840	0.000	1.988	0.823
A5_CL1EL3	0.951	0.059	16.187	0.000	1.520	0.701
A5_CL1EL4	1.196	0.071	16.772	0.000	1.912	0.773
A5_LE1	0.692	0.043	15.982	0.000	1.106	0.718
GCL =~						
A5_CL1GL1	1.000			1.864	0.828	
A5_CL1GL2	0.939	0.063	14.805	0.000	1.751	0.704
A5_CL1GL3	1.145	0.073	15.586	0.000	2.134	0.923
A5_CL1GL4	1.134	0.073	15.553	0.000	2.113	0.881

Regressions:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
LZ_LS4 ~						
GCL	3.238	0.461	7.027	0.000	6.035	0.191
ECL	-1.901	2.500	-0.761	0.447	-3.043	-0.097
ICL	-0.956	2.059	-0.464	0.642	-1.884	-0.060
GCL ~						
ECL	-1.105	0.225	-4.912	0.000	-0.948	-0.948
ICL	0.452	0.173	2.614	0.009	0.477	0.477

Covariances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
ICL ~~						
ECL	2.597	0.157	16.567	0.000	0.825	0.825

Variances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
.A5_CL1IL1	1.152	0.493	2.334	0.020	1.152	0.229
.A5_CL1IL2	3.488	0.449	7.766	0.000	3.488	0.634
.A5_CL1IL3	1.517	0.485	3.126	0.002	1.517	0.300
.A5_SA1	1.242	0.228	5.450	0.000	1.242	0.481
.A5_CL1EL1	2.710	0.516	5.252	0.000	2.710	0.515
.A5_CL1EL2	1.880	0.553	3.402	0.001	1.880	0.322
.A5_CL1EL3	2.388	0.458	5.211	0.000	2.388	0.508
.A5_CL1EL4	2.467	0.580	4.250	0.000	2.467	0.403
.A5_LE1	1.148	0.212	5.428	0.000	1.148	0.484
.A5_CL1GL1	1.592	0.483	3.298	0.001	1.592	0.314
.A5_CL1GL2	3.127	0.464	6.746	0.000	3.127	0.505
.A5_CL1GL3	0.796	0.523	1.520	0.128	0.796	0.149
.A5_CL1GL4	1.294	0.545	2.375	0.018	1.294	0.225
.LZ_LS4	957.632	48.592	19.708	0.000	957.632	0.963
ICL	3.881	0.328	11.837	0.000	1.000	1.000
ECL	2.556	0.228	11.218	0.000	1.000	1.000
.GCL	2.154	0.305	7.055	0.000	0.620	0.620

R-Square:

	Estimate
A5_CL1IL1	0.771
A5_CL1IL2	0.366
A5_CL1IL3	0.700
A5_SA1	0.519
A5_CL1EL1	0.485
A5_CL1EL2	0.678
A5_CL1EL3	0.492
A5_CL1EL4	0.597
A5_LE1	0.516
A5_CL1GL1	0.686
A5_CL1GL2	0.495
A5_CL1GL3	0.851
A5_CL1GL4	0.775
LZ_LS4	0.037
GCL	0.380

3.2.9 Multiple lineare Regressionen CLT

ICL, ECL --> GCL

Deskriptive Statistiken

	Mittelwert	Std.- Abweichung	N
GL_all	7,2279	1,61498	130
IL_all	2,8904	1,60539	130
EL_all	2,2831	1,37958	130

Korrelationen

	GL_all	IL_all	EL_all
Korrelation nach Pearson	GL_all	1,000	-0,292
	IL_all	-0,292	1,000
	EL_all	-0,453	0,737
Sig. (1-seitig)	GL_all	0,000	0,000
	IL_all	0,000	0,000
	EL_all	0,000	0,000
N	GL_all	130	130
	IL_all	130	130
	EL_all	130	130

Aufgenommene/Entfernte Variablen^a

Modell	Aufgenommene Variablen	Entfernte Variablen	Methode
1	EL_all, IL_all ^b		Einschluß

a. Abhängige Variable: GL_all
b. Alle gewünschten Variablen wurden eingegeben.

Modellzusammenfassung^b

Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers	Durbin-Watson-Statistik
1	,457 ^a	0,209	0,196	1,44788	1,738

a. Einflußvariablen : (Konstante), EL_all, IL_all
b. Abhängige Variable: GL_all

ANOVA^a

Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
1	Regression	70,216	2	35,108	16,747	,000 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	266,236	127	2,096		
	Gesamt	336,452	129			

a. Abhängige Variable: GL_all
b. Einflußvariablen : (Konstante), EL_all, IL_all

Koeffizienten^a

Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.	95,0% Konfidenzintervalle für B		Nullter Ordnung	Korrelationen		Kollinearitätsstatistik	
		Regressionskoeffizient	Std.-Fehler				Untergrenze	Obergrenze		Partiell	Teil	Toleranz	VIF
1	(Konstante)	8,352	0,270		30,990	0,000	7,819	8,885					
	IL_all	0,092	0,117	0,091	0,781	0,437	-0,141	0,324	-0,292	0,069	0,062	0,457	2,187
	EL_all	-0,608	0,137	-0,520	-4,452	0,000	-0,879	-0,338	-0,453	-0,367	-0,351	0,457	2,187

a. Abhängige Variable: GL_all

Kollinearitätsdiagnose^a

Modell		Eigenwert	Konditionsindex		Varianzanteile	
			(Konstante)	IL_all	EL_all	EL_all
1	1	2,777	1,000	0,03	0,01	0,01
	2	0,158	4,199	0,94	0,07	0,18
	3	0,065	6,530	0,03	0,92	0,81

a. Abhängige Variable: GL_all

Residuenstatistik^a

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.- Abweichung	N
Nicht standardisierte vorhergesagte r Wert	5,4602	8,4296	7,2279	0,73777	130
Standardisierter vorhergesagter Wert	-2,396	1,629	0,000	1,000	130
Standardfehler des Vorhersagewerts	0,129	0,415	0,213	0,056	130
Korrigierter Vorhersagewert	5,3540	8,5268	7,2308	0,73729	130
Nicht standardisierte Residuen	-3,27629	3,26122	0,00000	1,43661	130
Standardisierte Residuen	-2,263	2,252	0,000	0,992	130
Stud. nicht standardisierte Residuen	-2,295	2,282	-0,001	1,004	130
Gelöschtes Residuum	-3,36987	3,34783	-0,00291	1,47105	130
Stud. gelöschtes Residuum	-2,335	2,321	-0,002	1,010	130
Mahalanobis-Abstand	0,027	9,580	1,985	1,654	130
Cook-Distanz	0,000	0,082	0,008	0,012	130
Zentrierter Hebelwert	0,000	0,074	0,015	0,013	130

a. Abhängige Variable: GL_all

Anhang

ECL --> GCL

Deskriptive Statistiken

	Mittelwert	Std.- Abweichung	N
GL_all	7,2279	1,61498	130
EL_all	2,2831	1,37958	130

Korrelationen

	GL_all	EL_all
Korrelation	GL_all	1,000
nach Pearson	EL_all	-0,453
Sig. (1-seitig)	GL_all	0,000
	EL_all	0,000
N	GL_all	130
	EL_all	130

Aufgenommene/Entfernte Variablen^a

Modell	Aufgenommene Variablen	Entfernte Variablen	Methode
1	EL_all ^b		Einschluß

- a. Abhängige Variable: GL_all
b. Alle gewünschten Variablen wurden eingegeben.

Modellzusammenfassung^b

Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers	Durbin-Watson-Statistik
1	,453 ^a	0,205	0,199	1,44567	1,745

- a. Einflußvariablen : (Konstante), EL_all
b. Abhängige Variable: GL_all

ANOVA^a

Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
1	Regression	68,939	1	68,939	32,986	,000 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	267,513	128	2,090		
	Gesamt	336,452	129			

- a. Abhängige Variable: GL_all
b. Einflußvariablen : (Konstante), EL_all

Koeffizienten^a

Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.	95,0% Konfidenzintervalle für B		Nullter Ordnung	Korrelationen		Kollinearitätsstatistik	
		Regressionskoeffizient	Std.-Fehler				Untergrenze	Obergrenze		Partiell	Teil	Toleranz	VIF
1	(Konstante)	8,438	0,246		34,319	0,000	7,951	8,924					
	EL_all	-0,530	0,092	-0,453	-5,743	0,000	-0,712	-0,347	-0,453	-0,453	-0,453	1,000	1,000

- a. Abhängige Variable: GL_all

Kollinearitätsdiagnose^a

Modell		Eigenwert	Konditionsindex	Varianzanteile	
				(Konstante)	EL_all
1	1	1,857	1,000	0,07	0,07
	2	0,143	3,600	0,93	0,93

- a. Abhängige Variable: GL_all

Residuenstatistik^a

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.- Abweichung	N
Nicht standardisierte vorhergesagte r Wert	5,4703	8,3317	7,2279	0,73103	130
Standardisierter vorhergesagter Wert	-2,404	1,510	0,000	1,000	130
Standardfehler des Vorhersagewerts	0,127	0,331	0,174	0,045	130
Korrigierter Vorhersagewert	5,3647	8,4184	7,2293	0,73000	130
Nicht standardisierte Residuen	-3,33170	3,21587	0,00000	1,44005	130
Standardisierte Residuen	-2,305	2,224	0,000	0,996	130
Stud. nicht standardisierte Residuen	-2,334	2,252	0,000	1,005	130
Gelöschtes Residuum	-3,41841	3,29583	-0,00138	1,46570	130
Stud. gelöschtes Residuum	-2,376	2,289	-0,002	1,011	130
Mahalanobis-Abstand	0,000	5,781	0,992	1,144	130
Cook-Distanz	0,000	0,118	0,009	0,016	130
Zentrierter Hebelwert	0,000	0,045	0,008	0,009	130

- a. Abhängige Variable: GL_all

Anhang

ICL, ECL, GCL --> LZ (LS9)

Deskriptive Statistiken

	Mittelwert	Std.-Abweichung	N
LZ_ChI	20,1136	25,17687	110
IL_ChI	3,2481	1,74352	110
EL_ChI	2,5032	1,60860	110
GL_ChI	7,1106	2,11269	110

Korrelationen

	LZ_ChI	IL_ChI	EL_ChI	GL_ChI
Korrelation nach Pearson				
LZ_ChI	1,000	-0,109	-0,053	-0,038
IL_ChI	-0,109	1,000	0,574	-0,091
EL_ChI	-0,053	0,574	1,000	-0,458
GL_ChI	-0,038	-0,091	-0,458	1,000
Sig. (1-seitig)				
LZ_ChI		0,128	0,290	0,347
IL_ChI	0,128		0,000	0,173
EL_ChI	0,290	0,000		0,000
GL_ChI	0,347	0,173	0,000	
N				
LZ_ChI	110	110	110	110
IL_ChI	110	110	110	110
EL_ChI	110	110	110	110
GL_ChI	110	110	110	110

Aufgenommene/Entfernte Variablen^a

Modell	Aufgenommene Variablen	Entfernte Variablen	Methode
1	GL_ChI, IL_ChI, EL_ChI ^b		Einschluß

a. Abhängige Variable: LZ_ChI

b. Alle gewünschten Variablen wurden eingegeben.

Modellzusammenfassung^b

Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers	Durbin-Watson Statistik
1	,120 ^a	0,014	-0,013	25,34575	1,762

a. Einflußvariablen : (Konstante), GL_ChI, IL_ChI, EL_ChI

b. Abhängige Variable: LZ_ChI

ANOVA^a

Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
1	Regression	997,201	3	332,400	0,517	,671 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	68095,128	106	642,407		
	Gesamt	69092,330	109			

a. Abhängige Variable: LZ_ChI

b. Einflußvariablen : (Konstante), GL_ChI, IL_ChI, EL_ChI

Koeffizienten^a

Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.	95,0% Konfidenzintervalle für B		Nullter Ordnung	Korrelationen		Kollinearitätsstatistik	
		Regressionkoeffizient	Std.-Fehler				Untergrenze	Obergrenze		Partiell	Teil	Toleranz	VIF
1	(Konstante)	30,505	12,006		2,541	0,013	6,702	54,309					
	IL_ChI	-1,484	1,750	-0,103	-0,848	0,398	-4,953	1,985	-0,109	-0,082	-0,082	0,633	1,579
	EL_ChI	-0,315	2,124	-0,020	-0,148	0,882	-4,526	3,896	-0,053	-0,014	-0,014	0,505	1,981
	GL_ChI	-0,673	1,330	-0,056	-0,506	0,614	-3,309	1,964	-0,038	-0,049	-0,049	0,747	1,340

a. Abhängige Variable: LZ_ChI

Kollinearitätsdiagnose^a

Modell		Eigenwert	Konditionsindex	Varianzanteile			
				(Konstante)	IL_ChI	EL_ChI	GL_ChI
1	1	3,574	1,000	0,00	0,01	0,01	0,00
	2	0,302	3,440	0,01	0,04	0,21	0,08
	3	0,100	5,967	0,03	0,02	0,38	0,00
	4	0,024	12,209	0,95	0,03	0,39	0,92

a. Abhängige Variable: LZ_ChI

Residuenstatistik^a

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-Abweichung	N
Nicht standardisierte vorhergesagte r Wert	11,7873	26,6429	20,1136	3,02467	110
Standardisierte vorhergesagte r Wert	-2,753	2,159	0,000	1,000	110
Standardfehler des Vorhersagewerts	2,677	9,295	4,619	1,429	110
Korrigierter Vorhersagewert	7,9625	28,5067	20,0786	3,37626	110
Nicht standardisierte Residuen	-68,25406	70,97970	0,00000	24,99452	110
Standardisierte Residuen	-2,693	2,800	0,000	0,986	110
Stud. nicht standardisierte Residuen	-2,714	2,860	0,001	1,005	110
Gelöschtes Residuum	-69,30627	74,04913	0,03504	25,97024	110
Stud. gelöschtes Residuum	-2,800	2,964	0,000	1,017	110
Mahalanobis-Abstand	0,225	13,668	2,973	2,721	110
Cook-Distanz	0,000	0,121	0,010	0,020	110
Zentrierter Hebelwert	0,002	0,125	0,027	0,025	110

a. Abhängige Variable: LZ_ChI

3.2.10 Strukturgleichungsmodell CLT und UEQ

Estimator	ML	
Optimization method	NLMINB	
Number of model parameters	14	
	Used	Total
Number of observations	264	629
Model Test User Model:		
	Standard	Robust
Test Statistic	19.146	11.032
Degrees of freedom	11	11
P-value (Chi-square)	0.059	0.441
Scaling correction factor	1.736	
Yuan-Bentler correction (Mplus variant)		
Model Test Baseline Model:		
Test statistic	449.192	314.644
Degrees of freedom	20	20
P-value	0.000	0.000
Scaling correction factor	1.428	
User Model versus Baseline Model:		
Comparative Fit Index (CFI)	0.981	1.000
Tucker-Lewis Index (TLI)	0.965	1.000
Robust Comparative Fit Index (CFI)		1.000
Robust Tucker-Lewis Index (TLI)		1.000
Loglikelihood and Information Criteria:		
Loglikelihood user model (H0)	-1954.166	-1954.166
Scaling correction factor for the MLR correction	1.390	
Loglikelihood unrestricted model (H1)	-1944.593	-1944.593
Scaling correction factor for the MLR correction	1.542	
Akaike (AIC)	3936.333	3936.333
Bayesian (BIC)	3986.396	3986.396
Sample-size adjusted Bayesian (BIC)	3942.009	3942.009
Root Mean Square Error of Approximation:		
RMSEA	0.053	0.003
90 Percent confidence interval - lower	0.000	0.000
90 Percent confidence interval - upper	0.092	0.054
P-value RMSEA <= 0.05	0.404	0.926

Anhang

Robust RMSEA	0.004
90 Percent confidence interval - lower	0.000
90 Percent confidence interval - upper	0.085

Standardized Root Mean Square Residual:

SRMR	0.056	0.056
------	-------	-------

Parameter Estimates:

Standard errors	Sandwich
Information bread	Observed
Observed information based on	Hessian

Regressions:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
GL_AR ~						
IL_AR	0.271	0.116	2.347	0.019	0.271	0.203
EL_AR	-0.896	0.118	-7.605	0.000	-0.896	-0.661
UEQ_Stimu	0.290	0.059	4.901	0.000	0.290	0.249
EL_AR ~						
UEQ_Steu	0.026	0.083	0.308	0.758	0.026	0.014
UEQ_Durch	-0.076	0.076	-1.001	0.317	-0.076	-0.036
UEQ_Eff	-0.100	0.065	-1.547	0.122	-0.100	-0.054
UEQ_Stimu	-0.155	0.033	-4.688	0.000	-0.155	-0.180

Covariances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
.EL_AR ~~						
IL_AR	1.277	0.210	6.095	0.000	1.277	0.784
UEQ_Stimu ~~						
UEQ_Eff	0.224	0.084	2.677	0.007	0.224	0.219

Variances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
.GL_AR	1.818	0.193	9.426	0.000	1.818	0.603
.EL_AR	1.575	0.211	7.464	0.000	1.575	0.959
IL_AR	1.684	0.222	7.599	0.000	1.684	1.000
UEQ_Stimu	2.210	0.220	10.043	0.000	2.210	1.000
UEQ_Eff	0.474	0.062	7.627	0.000	0.474	1.000

R-Square:

	Estimate
GL_AR	0.397
EL_AR	0.041

3.2.11 MANOVA UEQ und CLT (Mitochondrien und Chloroplasten)

Tests auf Normalverteilung

Stimu_Kat		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
EL_all	geringe Stimulation	0,072	45	,200	0,969	45	0,256
	hohe Stimulation	0,151	74	0,000	0,908	74	0,000
GL_all	geringe Stimulation	0,091	45	,200	0,984	45	0,780
	hohe Stimulation	0,087	74	,200	0,981	74	0,315

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.
a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

Stimu_Kat	Basiert auf	Levene-	df1	df2	Sig.
		Statistik			
EL_all	dem Mittelwert	3,211	1	98	0,076
	dem Median	3,197	1	98	0,077
	dem Median und mit angepassten df	3,197	1	97,949	0,077
	dem getrimmten Mittel	3,379	1	98	0,069
GL_all	dem Mittelwert	10,258	1	98	0,002
	dem Median	10,113	1	98	0,002
	dem Median und mit angepassten df	10,113	1	88,627	0,002
	dem getrimmten Mittel	10,293	1	98	0,002

Prüft die Nullhypothese, dass die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen
ä. Design: Konstanter Term + Stimu_Kat2

Box-Test auf Gleichheit der Kovarianz-Matrizen^a

Box' M	10,166
F	3,313
df1	3
df2	5270593,422
Sig.	0,019

Deskriptive Statistiken

Stimu_Kat2		Mittelwert	Standardabweichung	N
EL_all	geringe Stimulation	2,6678	1,43958	45
	hohe Stimulation	1,7800	1,13307	55
	Gesamt	2,1795	1,34848	100
GL_all	geringe Stimulation	6,2222	1,72422	45
	hohe Stimulation	7,9159	1,13321	55
	Gesamt	7,1538	1,65496	100

Korrelationen

	EL_all	GL_all
EL_all	Pearson-Korrelation 1	-,453 ^{**}
	Sig. (2-seitig)	0,000
	N	130
GL_all	Pearson-Korrelation -,453 ^{**}	1
	Sig. (2-seitig)	0,000
	N	130

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig)

Zwischensubjektfaktoren

Stimu_Kat2	Wertbeschriftung	N
1,00	geringe Stimulation	45
	hohe Stimulation	55
2,00	geringe Stimulation	45
	hohe Stimulation	55

Anhang

Box-Test auf Gleichheit der Kovarianzmatrizen^a

Box' M	10,166
F	3,313
df1	3
df2	5270593,422
Sig.	0,019

Prüft die Nullhypothese, dass

a. Design: Konstanter Term +

Multivariate Tests^a

Effekt		Wert	F	Hypothese df	Fehler df	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
Konstanter Term	Pillai-Spur	0,977	2090,149 ^b	2,000	97,000	0,000	0,977
	Wilks-Lambda	0,023	2090,149 ^b	2,000	97,000	0,000	0,977
	Hotelling-Spur	43,096	2090,149 ^b	2,000	97,000	0,000	0,977
	Größte charakteristische Wurzel nach Roy	43,096	2090,149 ^b	2,000	97,000	0,000	0,977
Stimu_Kat2	Pillai-Spur	0,268	17,725 ^b	2,000	97,000	0,000	0,268
	Wilks-Lambda	0,732	17,725 ^b	2,000	97,000	0,000	0,268
	Hotelling-Spur	0,365	17,725 ^b	2,000	97,000	0,000	0,268
	Größte charakteristische Wurzel nach Roy	0,365	17,725 ^b	2,000	97,000	0,000	0,268

a. Design: Konstanter Term + Stimu_Kat2

b. Exakte Statistik

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

		Levene-Statistik	df1	df2	Sig.
EL_all	Basiert auf dem Mittelwert	3,211	1	98	0,076
	Basiert auf dem Median	3,197	1	98	0,077
	Basierend auf dem Median und mit angepassten df	3,197	1	97,949	0,077
	Basiert auf dem getrimmten Mittel	3,379	1	98	0,069
GL_all	Basiert auf dem Mittelwert	10,258	1	98	0,002
	Basiert auf dem Median	10,113	1	98	0,002
	Basierend auf dem Median und mit angepassten df	10,113	1	88,627	0,002
	Basiert auf dem getrimmten Mittel	10,293	1	98	0,002

Prüft die Nullhypothese, dass die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen

a. Design: Konstanter Term + Stimu_Kat2

Tests der Zwischensubjekteffekte

Quelle		Typ III Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
Korrigiertes Modell	EL_all	19,507 ^a	1	19,507	11,910	0,001	0,108
	GL_all	70,997 ^b	1	70,997	34,762	0,000	0,262
Konstanter Term	EL_all	489,622	1	489,622	298,934	0,000	0,753
	GL_all	4947,197	1	4947,197	2422,256	0,000	0,961
Stimu_Kat2	EL_all	19,507	1	19,507	11,910	0,001	0,108
	GL_all	70,997	1	70,997	34,762	0,000	0,262
Fehler	EL_all	160,514	98	1,638			
	GL_all	200,154	98	2,042			
Gesamt	EL_all	655,043	100				
	GL_all	5388,766	100				
Korrigierte Gesamtvarianz	EL_all	180,020	99				
	GL_all	271,152	99				

a. R-Quadrat = ,108 (korrigiertes R-Quadrat = ,099)

b. R-Quadrat = ,262 (korrigiertes R-Quadrat = ,254)

3.2.12 Strukturgleichungsmodelle CLT und ELU

Modell: ungerichteter Zusammenhang zwischen ECL, GCL und ELU

Estimator	ML	
Optimization method	NLMINB	
Number of model parameters	20	
	Used	Total
Number of observations	285	629
Model Test User Model:		
	Standard	Robust
Test Statistic	55.074	47.051
Degrees of freedom	25	25
P-value (Chi-square)	0.000	0.005
Scaling correction factor		1.171
Yuan-Bentler correction (Mplus variant)		
Model Test Baseline Model:		
Test statistic	1616.239	1176.859
Degrees of freedom	36	36
P-value	0.000	0.000
Scaling correction factor		1.373
User Model versus Baseline Model:		
Comparative Fit Index (CFI)	0.981	0.981
Tucker-Lewis Index (TLI)	0.973	0.972
Robust Comparative Fit Index (CFI)		0.984
Robust Tucker-Lewis Index (TLI)		0.976
Loglikelihood and Information Criteria:		
Loglikelihood user model (H0)	-4956.612	-4956.612
Scaling correction factor for the MLR correction		1.524
Loglikelihood unrestricted model (H1)	-4929.075	-4929.075
Scaling correction factor for the MLR correction		1.328
Akaike (AIC)	9953.224	9953.224
Bayesian (BIC)	10026.274	10026.274
Sample-size adjusted Bayesian (BIC)	9962.853	9962.853
Root Mean Square Error of Approximation:		
RMSEA	0.065	0.056
90 Percent confidence interval - lower	0.042	0.032
90 Percent confidence interval - upper	0.088	0.078
P-value RMSEA <= 0.05	0.135	0.317

Anhang

Robust RMSEA	0.060
90 Percent confidence interval - lower	0.033
90 Percent confidence interval - upper	0.086

Standardized Root Mean Square Residual:

SRMR	0.043	0.043
------	-------	-------

Parameter Estimates:

Standard errors	Sandwich
Information bread	Observed
Observed information based on	Hessian

Latent Variables:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
PLS_ARV3 =~						
LernenAR_LE1	1.000				2.532	0.817
LernenAR_LE2	1.049	0.054	19.314	0.000	2.656	0.944
LernenAR_LE3	0.666	0.063	10.548	0.000	1.685	0.641
LernenAR_LE4	0.956	0.055	17.352	0.000	2.422	0.831
LernenAR_LE5	0.886	0.065	13.583	0.000	2.244	0.836
LernenAR_LE6	0.805	0.067	12.043	0.000	2.037	0.689

Regressions:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
GL_AR ~						
IL_AR	0.332	0.107	3.096	0.002	0.332	0.238
EL_AR	-1.032	0.108	-9.577	0.000	-1.032	-0.748

Covariances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
IL_AR ~~						
EL_AR	1.261	0.212	5.939	0.000	1.261	0.764
PLS_ARV3 ~~						
EL_AR	-0.627	0.156	-4.019	0.000	-0.247	-0.191
.GL_AR	0.956	0.231	4.138	0.000	0.378	0.261

Variances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
.LernenAR_LE1	3.198	0.497	6.433	0.000	3.198	0.333
.LernenAR_LE2	0.869	0.210	4.137	0.000	0.869	0.110
.LernenAR_LE3	4.075	0.446	9.139	0.000	4.075	0.589
.LernenAR_LE4	2.623	0.375	6.997	0.000	2.623	0.309
.LernenAR_LE5	2.170	0.388	5.592	0.000	2.170	0.301
.LernenAR_LE6	4.586	0.557	8.233	0.000	4.586	0.525
.GL_AR	2.089	0.188	11.103	0.000	2.089	0.656
IL_AR	1.629	0.209	7.800	0.000	1.629	1.000
EL_AR	1.673	0.232	7.220	0.000	1.673	1.000

Anhang

PLS_ARv3	6.411	0.715	8.962	0.000	1.000	1.000
----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

R-Square:

	Estimate
LernenAR_LE1	0.667
LernenAR_LE2	0.890
LernenAR_LE3	0.411
LernenAR_LE4	0.691
LernenAR_LE5	0.699
LernenAR_LE6	0.475
GL_AR	0.344

Anhang

Modell: gerichteter Zusammenhang zwischen ECL, GCL zu ELU

Estimator	ML	
Optimization method	NLMINB	
Number of model parameters	20	
	Used	Total
Number of observations	285	629
Model Test User Model:		
	Standard	Robust
Test Statistic	62.902	53.676
Degrees of freedom	25	25
P-value (Chi-square)	0.000	0.001
Scaling correction factor		1.172
Yuan-Bentler correction (Mplus variant)		
Model Test Baseline Model:		
Test statistic	1616.239	1176.859
Degrees of freedom	36	36
P-value	0.000	0.000
Scaling correction factor		1.373
User Model versus Baseline Model:		
Comparative Fit Index (CFI)	0.976	0.975
Tucker-Lewis Index (TLI)	0.965	0.964
Robust Comparative Fit Index (CFI)		0.979
Robust Tucker-Lewis Index (TLI)		0.969
Loglikelihood and Information Criteria:		
Loglikelihood user model (H0)	-4960.526	-4960.526
Scaling correction factor for the MLR correction		1.522
Loglikelihood unrestricted model (H1)	-4929.075	-4929.075
Scaling correction factor for the MLR correction		1.328
Akaike (AIC)	9961.052	9961.052
Bayesian (BIC)	10034.102	10034.102
Sample-size adjusted Bayesian (BIC)	9970.680	9970.680
Root Mean Square Error of Approximation:		
RMSEA	0.073	0.063
90 Percent confidence interval - lower	0.051	0.042
90 Percent confidence interval - upper	0.096	0.085
P-value RMSEA <= 0.05	0.046	0.143

Anhang

Robust RMSEA	0.069
90 Percent confidence interval - lower	0.043
90 Percent confidence interval - upper	0.094

Standardized Root Mean Square Residual:

SRMR	0.047	0.047
------	-------	-------

Parameter Estimates:

Standard errors	Sandwich
Information bread	Observed
Observed information based on	Hessian

Latent Variables:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
PLS_ARV3 =~						
LernenAR_LE1	1.000				2.529	0.816
LernenAR_LE2	1.051	0.055	19.158	0.000	2.658	0.944
LernenAR_LE3	0.666	0.063	10.507	0.000	1.685	0.641
LernenAR_LE4	0.957	0.056	17.118	0.000	2.420	0.831
LernenAR_LE5	0.887	0.066	13.491	0.000	2.244	0.836
LernenAR_LE6	0.807	0.067	12.017	0.000	2.040	0.690

Regressions:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
GL_AR ~						
IL_AR	0.326	0.106	3.064	0.002	0.326	0.232
EL_AR	-1.032	0.108	-9.583	0.000	-1.032	-0.748
PLS_ARV3 ~						
EL_AR	-0.007	0.145	-0.049	0.961	-0.003	-0.004
GL_AR	0.508	0.120	4.221	0.000	0.201	0.359

Covariances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
IL_AR ~~						
EL_AR	1.268	0.221	5.743	0.000	1.268	0.766

Variances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z)	Std.lv	Std.all
.LernenAR_LE1	3.215	0.503	6.390	0.000	3.215	0.335
.LernenAR_LE2	0.860	0.213	4.038	0.000	0.860	0.109
.LernenAR_LE3	4.076	0.446	9.145	0.000	4.076	0.589
.LernenAR_LE4	2.632	0.379	6.945	0.000	2.632	0.310
.LernenAR_LE5	2.170	0.388	5.589	0.000	2.170	0.301
.LernenAR_LE6	4.573	0.556	8.230	0.000	4.573	0.524
.GL_AR	2.089	0.188	11.105	0.000	2.089	0.652
.IL_AR	1.629	0.209	7.800	0.000	1.629	1.000
.EL_AR	1.685	0.245	6.884	0.000	1.685	1.000
.PLS_ARV3	5.559	0.688	8.080	0.000	0.869	0.869

R-Square:

	Estimate
LernenAR_LE1	0.665
LernenAR_LE2	0.891
LernenAR_LE3	0.411
LernenAR_LE4	0.690
LernenAR_LE5	0.699
LernenAR_LE6	0.476
GL_AR	0.348
PLS_ARv3	0.131

3.2.13 Multiple lineare Regression ARI und LZ

Deskriptive Statistiken

	Mittelwert	Std.-Abweichung	N
LZ	2,4082	3,27184	49
eng_MLR	4,1327	0,30768	49
ina_MLR	3,1959	0,34998	49
imm_MLR	3,5598	0,38887	49

Korrelationen

		LZ	eng_MLR	ina_MLR	imm_MLR
Korrelation nach Pearson	LZ	1,000	0,149	0,042	0,270
	eng_MLR	0,149	1,000	0,382	0,592
	ina_MLR	0,042	0,382	1,000	0,748
	imm_MLR	0,270	0,592	0,748	1,000
Sig. (1-seitig)	LZ		0,153	0,389	0,030
	eng_MLR	0,153		0,003	0,000
	ina_MLR	0,389	0,003		0,000
	imm_MLR	0,030	0,000	0,000	
N	LZ	49	49	49	49
	eng_MLR	49	49	49	49
	ina_MLR	49	49	49	49
	imm_MLR	49	49	49	49

Aufgenommene/Entfernte Variablen^a

Modell	Aufgenommene Variablen	Entfernte Variablen	Methode
1	imm_MLR, eng_MLR, ina_MLR ^b		Einschluß

- a. Abhängige Variable: LZ
 b. Alle gewünschten Variablen wurden eingegeben.

Modellzusammenfassung^b

Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers	Durbin-Watson-Statistik
1	,365 ^a	0,133	0,076	3,14585	2,352

- a. Einflußvariablen : (Konstante), imm_MLR, eng_MLR, ina_MLR
 b. Abhängige Variable: LZ

ANOVA^a

Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
1	Regression	68,501	3	22,834	2,307	,089 ^b
	Nicht standardisierte Residuen	445,336	45	9,896		
	Gesamt	513,837	48			

- a. Abhängige Variable: LZ
 b. Einflußvariablen : (Konstante), imm_MLR, eng_MLR, ina_MLR

Koeffizienten^a

Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.	95,0% Konfidenzintervalle für B		Nullter Ordnung	Korrelationen			Kollinearitätsstatistik		
		Regressionskoeffizient	Std.-Fehler	Beta			Untergrenze	Obergrenze		Partiell	Teil	Toleranz	VIF		
1	(Konstante)	-1,594	6,496		-0,245	0,807	-14,677	11,489							
	eng_MLR	-0,535	1,842	-0,050	-0,291	0,773	-4,245	3,174	0,149	-0,043	-0,040	0,642	1,558		
	ina_MLR	-3,469	1,966	-0,371	-1,765	0,084	-7,428	0,490	0,042	-0,254	-0,245	0,436	2,295		
	imm_MLR	4,860	2,027	0,578	2,397	0,021	0,777	8,943	0,270	0,337	0,333	0,332	3,014		

- a. Abhängige Variable: LZ

Kollinearitätsdiagnose^a

Modell	Eigenwert	Konditionsindex	Varianzanteile			
			(Konstante)	eng_MLR	ina_MLR	imm_MLR
1	1	3,987	1,000	0,00	0,00	0,00
	2	0,008	22,581	0,22	0,07	0,20
	3	0,004	33,087	0,27	0,21	0,42
	4	0,002	46,960	0,52	0,72	0,38

- a. Abhängige Variable: LZ

Residuenstatistik^a

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-Abweichung	N
Nicht standardisierter vorhergesagter Wert	-0,8164	5,0322	2,4082	1,19461	49
Standardisierter vorhergesagter Wert	-2,699	2,197	0,000	1,000	49
Standardfehler des Vorhersagewerts	0,450	1,386	0,867	0,241	49
Korrigierter Vorhersagewert	-0,9879	4,7867	2,4077	1,20961	49
Nicht standardisierte Residuen	-6,38840	7,30641	0,00000	3,04595	49
Standardisierte Residuen	-2,031	2,323	0,000	0,968	49
Stud. nicht standardisierte Residuen	-2,060	2,368	0,000	1,008	49
Gelöschtes Residuum	-6,57699	7,59826	0,00049	3,30290	49
Stud. gelöschtes Residuum	-2,141	2,503	0,003	1,027	49

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-Abweichung	N
Mahalanobis-Abstand	0,004	8,332	2,939	2,212	49
Cook-Distanz	0,000	0,121	0,021	0,030	49
Zentrierter Hebelwert	0,000	0,174	0,061	0,046	49

- a. Abhängige Variable: LZ

