
**Entwicklung einer Augmented Reality basierten
Anwendung als Vorbereitungsmaßnahme zum
Laborpraktikum in der Elektrotechnik**

Mesut Alptekin

Universitätsdissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor Ingenieur
(*Dr. Ing.*)

im Fachgebiet
Technikdidaktik

eingereicht an der
Fakultät EIM - Institut für Elektrotechnik
der Universität Paderborn

Datum: 12. Dezember 2025

Dieses Werk steht unter einer Creative Commons Lizenz:
Namensnennung 4.0 International.
Dies gilt nicht für zitierte Inhalte anderer Autoren.
Eine Kopie dieser Lizenz finden Sie unter <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Betreuerin

Prof. Dr.-Ing. Katrin Temmen
Fachgebiet Technikdidaktik, Universität Paderborn

Gutachter*in

Prof. Dr.-Ing. Katrin Temmen
Universität Paderborn

Prof. Dr.-Ing. Dominik May
Bergische Universität Wuppertal

Online veröffentlicht unter:
Universität Paderborn
<https://doi.org/XX.XXXXXX/publishup-XXXXXX>
<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:XXX-opusX-XXXXXX>

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe verfasst sowie keine anderen als die im Literaturverzeichnis aufgeführten Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen wurden als solche kenntlich gemacht.

Paderborn, 15. Dezember 2025

Ort, Datum

Unterschrift

Zusammenfassung

Diese Dissertation behandelt die Entwicklung, Erprobung und Evaluation einer mobilen Augmented Reality Anwendung (mAR-App) namens PEARL (Paderborner Elektrotechnik AR Laborpraktikum), die als Vorbereitungsmaßnahme für elektrotechnische Laborpraktika konzipiert wird. Ziel ist es, Studierenden eine zeitlich und örtlich flexible Möglichkeit zu bieten, den realitätsnahen Umgang mit Laborgeräten – primär dem Oszilloskop – zu erlernen. Die methodische Grundlage bilden der Makrozyklus von Design-Based Research (DBR) als strukturierender Rahmen und das heuristische Modell des Research Pentagons, das die Durchführung auf Mikroebene bestimmt.

In insgesamt vier Research Pentagons werden didaktische, technologische, motivationale und evaluative Komponenten systematisch untersucht und weiterentwickelt. Das erste Pentagon fokussiert die Entwicklung eines didaktisch fundierten Konzepts nach dem Prinzip des Constructive Alignment, das Lernziele, Lernaktivitäten und Prüfungsformen in fünf abgestufte Lernlevel überführt. Diese reichen von der initialen Orientierung bis zur eigenständigen Problemlösung in einem freien Experimentiermodus.

Im zweiten Research Pentagon wird die technische Machbarkeit von Augmented - und Virtual Reality (VR) im Laborumfeld anhand mehrerer funktionaler Prototypen evaluiert. Während sich VR aufgrund technischer Einschränkungen als ungeeignet erweist, zeigt AR – insbesondere in der markerlosen Ausführung mittels der Software Development Kits (SDKs) ARCore und ARKit – ein hohes Potenzial für den praktischen Einsatz.

Im dritten Pentagon entsteht ein Onboarding-Modul, das auf die erste Version der mobilen App (V0.17.01) aufsetzt und grundlegende Funktionen eines realen Oszilloskops digital abbildet. Dabei werden Nutzer:innen schrittweise an das virtuelle Oszilloskop herangeführt und lernen zugleich die zentralen Funktionen der mAR-App kennen. Die Ergebnisse zeigen eine insgesamt neutrale bis leicht positive Nutzungserfahrung, wobei technische Schwächen (z. B. Reaktionszeit oder Objektverankerung) die Effizienz und Steuerbarkeit beeinträchtigen.

Im Exkurs-Kapitel erfolgt eine Eye-Tracking-Studie zur Untersuchung visueller Aufmerksamkeit und individueller Lösungsstrategien von Expert:innen und Noviz:innen bei der Arbeit am realen Oszilloskop. Heatmaps und Zeitverläufe in definierten Areas of Interest (AOI) liefern erste Hinweise auf Unterschiede im Blickverhalten zwischen den Gruppen. Die algorithmischen Scanpfadanalysen der Blickverläufe hingegen zeigen eine geringe Trennschärfe. Das Potenzial von Eye-Tracking als Evaluationsmethode wird daher kritisch reflektiert, aber angesichts technologischer Entwicklungen und verfügbarer Eye-Tracker in Mixed Reality (MR) Brillen weiterhin als zukunftsrelevant eingeordnet.

Die abschließende summative Evaluation nutzt ein Prä-Post-Test-Design mit Kontrollgruppenvergleich mit 70 Teilnehmenden, um die Lernwirksamkeit der überarbeiteten mAR-App mit klassischen Materialien wie Videos und Handbüchern zu vergleichen. In der Interventionsgruppe (IG) zeigen sich auf kognitiver und affektiver Ebene signifikant positive Veränderungen: Die Leistungen steigen deutlich, insbesondere in den Taxonomiestufen Anwendung, Verständnis und Analyse; zugleich nehmen experimentelles Selbstkonzept und experimentelles Sachinteresse zu, während Überforderung und Ängstlichkeit im Hinblick auf die Laborpraktika abnehmen. Als Einschränkung zeigt sich, dass die mAR-App keinen klaren Vorsprung gegenüber der Kontrollgruppe (KG) erreicht, was sowohl auf die sehr gut ausgearbeiteten Materialien und Videos der KG als auch auf technische Begrenzungen der mobilen Umsetzung zurückzuführen ist: Kleine Displays, 2D-Oberflächen für 3D-Geräte und unpräzise Touch-Interaktionen erschweren komplexe, feinmotorische Aufgaben. In den begleitenden User Interface (UI) und User Experience (UX) Fragebögen spiegeln sich diese Limitationen in gemischten Bewertungen der App wider.

Die Arbeit verdeutlicht, dass die mobile AR-Anwendung trotz technischer Einschränkungen wertvolle Möglichkeiten für die Vorbereitung auf Laborpraktika und das Kennenlernen von Laborgeräten bieten kann. Der Fokus bei der Entwicklung liegt von Beginn an auf einer modularen und flexiblen App-Architektur, um sie mit neuen Geräten und Aufgaben zu erweitern. Der Hauptnutzen liegt perspektivisch nicht in der mobilen Anwendung selbst, sondern in der strategischen Ausrichtung auf zukunftsfähige, skalierbare Lösungen für MR-Brillen. Diese erlauben eine authentische Gestensteuerung und realitätsnahe Interaktionen.

Abstract

This thesis examines the development, testing, and evaluation of a mobile augmented reality application (mAR app), which is designed as a preparation tool for electrical engineering laboratory courses. The aim is to offer students an opportunity to work with laboratory equipment — primarily the oscilloscope — realistically without location and time constraints. The methodological basis is formed by the macrocycle of design-based research (DBR) as a structured framework and the heuristic model of the research pentagon, which specifies the implementation at the micro level.

Didactic, technological, motivational, and evaluative components are systematically examined and further developed in a total of four research pentagons. The first pentagon focuses on the development of a didactically sound concept based on the principle of constructive alignment, which incorporates learning objectives, learning activities, and forms of assessment into five graduated learning levels. These range from initial orientation to independent problem-solving in a free experimentation mode.

The second phase evaluates the technical feasibility of augmented and virtual reality (VR) in the laboratory environment using several prototypes. While VR turns out to be unsuitable due to technical limitations, AR — especially in the markerless version using the ARCore and ARKit software development kits (SDKs) — shows great potential for everyday use.

In the third research pentagon, an onboarding module is created based on the first version of the mobile app (V0.17.01), which digitally maps the basic functions of a real oscilloscope. During this process, users are introduced to the virtual oscilloscope and become familiar with the main functions of the mAR app. The results show an overall neutral to slightly positive user experience, although technical weaknesses (e.g., reaction time and object fixing) negatively impact efficiency and controllability.

In the fourth research pentagon, an eye-tracking study is carried out to investigate visual attention and individual solution strategies of expert and novice users when working with real oscilloscopes. Heatmaps and time sequences in

defined areas of interest (AOI) provide first indications of differences in gaze behavior between the groups. The algorithmic scan path analysis, on the other hand, reveals a low degree of differentiation. The potential of eye tracking as an evaluation method is therefore critically reflected, but it is still considered to be relevant for future studies in light of technological advancements and the availability of eye trackers in mixed reality (MR) glasses.

The final summative evaluation is carried out in the way of a pre-post test design with 70 participants and compares the usage of traditional materials such as videos and manuals with the improved mAR app. In the intervention group (IG), significant improvements emerge on both cognitive and affective levels: performance increases particularly in the areas of application, understanding, and analysis, while experimental self-concept and subject-related interest rise and feelings of overload and anxiety regarding the lab courses decline. As a limitation, the mAR app does not yield a clear advantage over the control group (CG), which can be attributed both to the highly refined materials and videos used in the CG and to technical constraints inherent to the mobile implementation: small displays, 2D interfaces on 3D devices, and imprecise touch interaction limit complex, sensitive motor tasks. These limitations are also reflected in the accompanying user interface (UI) and user experience (UX) questionnaires, which indicate mixed app ratings.

Both groups show significant learning gains — particularly in the areas of application, understanding, and analysis. However, a significant advantage of the mAR App cannot be proven. Affective characteristics such as experimental self-concept and general experimental interests increase in both groups, while the feeling of fear before conducting real laboratory work decreases. The app itself achieves average ratings in user interface (UI) and user experience (UX) questionnaires.

The thesis demonstrates that, despite technical limitations, the mobile AR application can provide a valuable alternative for preparing students for laboratory courses and familiarizing them with laboratory equipment. From the very beginning, the primary goal during development was a modular and flexible app architecture that can be extended with new devices, tasks, and functions. The main benefit is not in the mobile application itself, but in the strategic direction of future-oriented and scalable solutions for MR glasses, which allow immersive and realistic gesture interactions.

Danksagung

Es ist geschafft – die Dissertation ist vollendet. Doch dieser Weg war keineswegs ein Alleingang. Viele Menschen haben mich auf unterschiedliche Weise begleitet, unterstützt und ermutigt. Ihnen allen gilt mein aufrichtiger Dank.

Meiner Doktormutter und meinem Zweitgutachter: Ein besonderer Dank gilt meiner Doktormutter, die diese Arbeit mit großer Geduld, Expertise und Verlässlichkeit begleitet hat. Du hast mir nicht nur fachlich den Rücken gestärkt, sondern mich auch motiviert, fokussiert und entlastet. Deine Betreuung war stets von Vertrauen, Offenheit und lösungsorientiertem Austausch geprägt. Für Deinen Rückhalt – auch in schwierigen Zeiten – bin ich zutiefst dankbar. Dass diese Dissertation abgeschlossen ist, verdanke ich maßgeblich Deiner konstanten und ermutigenden Begleitung.

Ebenso danke ich meinem Zweitgutachter, der sich kurzfristig bereit erklärt hat, diese Rolle zu übernehmen. Deine spontane Unterstützung ist keineswegs selbstverständlich.

Meiner Familie: Auch meiner Familie möchte ich danken. Ohne Euch wäre dieser Weg nicht möglich gewesen. Ihr habt mir durch Eure Unterstützung und die vielen Entscheidungen im Hintergrund überhaupt erst die Chance gegeben, diesen Bildungsweg einzuschlagen. Euer Zuspruch und Euer Humor haben in herausfordernden Phasen den Unterschied gemacht.

Meinen Arbeits- und Projektkolleg:innen: Was wäre der Arbeitsalltag ohne die (richtigen) Kolleg:innen: Ein großer Dank gilt daher allen, mit denen ich in den vergangenen Jahren zusammenarbeiten durfte. Eure Hilfsbereitschaft, Eure Impulse und Eure konstruktive Kritik haben wesentlich zur Qualität dieser Arbeit beigetragen. Darüber hinaus waren es viele kleine Gesten und Gespräche, die den Arbeitsalltag bereichert haben. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle Henrik für seinen einzigartigen Humor sowie seine Aufgeschlossenheit und Empathie in persönlichen Gesprächen. Auch Du, Leon, musst trotz Datenschutz namentlich erwähnt werden: Ich habe keine KI gebraucht, weil Du bessere und zuverlässigeren Antworten geliefert hast. Vielen Dank für Deinen stetigen Support.

Den studentischen Hilfskräften: Ohne die Unterstützung der studentischen Hilfskräfte wäre die technische Umsetzung der App kaum in dieser Form

möglich gewesen. Vielen Dank für Euer Engagement. Besonders danke ich Dir, Daniel, für Deine Ausdauer, Deine Eigenverantwortung und Deine Verlässlichkeit bei der schnellen Änderung und Entwicklung einzelner Bestandteile der Anwendung.

Meinen Freund:innen: Auch meinen engen Freund:innen gilt mein Dank. Sie waren in den entscheidenden Momenten präsent und haben mich zum richtigen Zeitpunkt auf andere Gedanken gebracht. Diese Art von Ausgleich war besonders wertvoll.

Dem Stifterverband: Darüber hinaus gilt mein Dank dem Stifterverband, der mich im Rahmen des Projekts DigiSelf finanziell unterstützt hat. Diese Förderung hat es mir ermöglicht, mich frei von Lehrverpflichtungen voll und ganz auf die Weiterentwicklung der App und den Abschluss dieser Arbeit zu konzentrieren.

Abschließend: Das Schreiben dieser Arbeit ist mir nicht zuletzt deshalb gelungen, weil es schon lange zu meinem Alltag gehört: Seit über zehn Jahren führe ich regelmäßig Tagebuch (mittlerweile vier verschiedene) und habe (zumindest früher) im Schnitt etwa 65 Bücher pro Jahr gelesen. Schreiben war für mich nie nur Werkzeug, sondern immer auch ein Ausdruck von Struktur, Reflexion und manchmal ein Ventil – auch wenn die Fußnoten dieses Mal etwas formeller ausfallen mussten als gewohnt. Das Schreiben hat geholfen – besonders in den Phasen, in denen sich die Gedanken nicht sortieren wollten. Daher möchte ich mit einem Zitat enden, das – bei aller Ironie – dennoch eine Wahrheit enthält. Es stammt von einem „weisen Denker“¹ (Snoop Dogg) und erinnert daran, dass auch Selbstmotivation ein zentraler Teil wissenschaftlicher Arbeit ist:

*,Last but not least, I wanna thank me
I wanna thank me for believing in me
I wanna thank me for doing all this hard work
I wanna thank me for never quitting
...
I wanna thank me for tryna do more right than wrong
I wanna thank me for just being me at all times.“*

– Snoop Dogg

¹ In Wahrheit ein permanent bekiffter G-Funk-Rapper und Ex-Gangmitglied, der seine Weisheit bevorzugt im Nebel natürlicher Gartenkräuter (Marihuana) findet.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iv
Abstract	vi
Danksagung	viii
Inhaltsverzeichnis	x
Abkürzungsverzeichnis	xv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Forschungsmethode: Research Pentagon	6
2.1 Definition des Research Pentagons	6
2.2 Komponenten des Research Pentagons	6
2.3 Einordnung und Abgrenzung zu Design-Based Research	8
I Abschnitt I - Grundlagen	10
3 Problemstellung: Elektrotechnik-Laborpraktika an der Universität Paderborn	11
3.1 Allgemeine Ziele und Bedeutung von Laborpraktika	11
3.2 Strukturierung der Laborpraktika	14
3.3 Herausforderungen der Laborpraktika	15
3.4 Maßnahmen und Entwicklungen zu den Laborpraktika	18
4 Literaturauswertung: AR Grundlagen	21
4.1 Definition und Geschichte zu AR	21

4.2	Datenerhebung	23
4.2.1	Methodisches Vorgehen	23
4.2.2	Quantitative Literatursammlung	24
4.2.3	Qualitative Literatursammlung	24
4.3	Quantitative Analyse und Auswertung zu AR in der Lehre seit 2010	26
4.4	Qualitative Analyse und Auswertung zu AR in technischen Laboren	32
4.4.1	AR-Anwendungen zur Nutzung während der Laborarbeit	32
4.4.2	AR-Anwendungen zur Vorbereitung auf die Laborarbeit	33
4.4.3	Potenziale von AR mit Fokus auf die Nutzung in Laboren	35
II	Abschnitt II - Mikrozyklen	38
5	Didaktisches Konzept	39
5.1	Problemstellung, Forschungsfragen und -ziel	39
5.2	Forschungsmethode	40
5.3	Forschungssituation: Lehr-Lern-Modelle und -Theorien	41
5.3.1	Lerntheorien	41
5.3.2	Constructive Alignment	43
5.3.3	Revised Bloom's Taxonomy	44
5.4	Forschungsgegenstand: Didaktisches Konzept	46
5.4.1	Lernziele	46
5.4.2	Lernaktivitäten	48
5.4.3	Prüfungsmethoden	55
5.5	Zusammenfassung und Reflexion	56
6	Machbarkeitsstudie	59
6.1	Forschungsfragen und -ziel	59
6.2	Forschungsmethode	60
6.3	Forschungssituation: Grundlagen für die Entwicklung der Prototypen	61
6.3.1	Entwicklungsumgebung Unity3D	61
6.3.2	Objektorientierte Softwareentwicklung	61
6.4	Forschungsgegenstand: Entwicklung der Prototypen	62
6.4.1	Das Oszilloskop – Technischer Aufbau und Funktionsweise	62
6.4.2	Das Oszilloskop – Softwaretechnischer Aufbau und Funktionsweise in Kombination mit dem Funktionsgenerator	64

6.4.3	AR-Prototypen	72
6.5	Zusammenfassung und Reflexion	79
7	Onboarding	84
7.1	Problemstellung, Forschungsfragen und -ziele	84
7.2	Forschungsmethode	85
7.3	Forschungssituation: Stand der Forschung zu Onboarding	86
7.3.1	Definition von Onboarding	86
7.3.2	Bedeutung des ersten Eindrucks und des Onboardings . .	87
7.3.3	Arten von Onboarding	88
7.3.4	Vor- und Nachteile von Onboarding	92
7.4	Forschungsgegenstand: Entwicklung und Auswertung des Onboardings in der AR-App	94
7.4.1	Verwendete Materialien	94
7.4.2	Entwicklung: Implementierung des progressiven Onboardings	97
7.4.3	Teilnehmende der Studie	100
7.4.4	Ergebnisse zum UI und UX	101
7.4.5	Ergebnisse zum Onboarding	104
7.5	Zusammenfassung und Reflexion	106
7.5.1	Zusammenfassung	106
7.5.2	Reflexion: Erweiterung des Onboardings	108
8	Exkurs: Eye-Tracking als Messinstrument	112
8.1	Problemstellung, Forschungsfragen und -ziel	112
8.2	Forschungsmethode	113
8.3	Forschungssituation: Annahmen und Grundlagen zu Eye-Tracking	115
8.3.1	Eye-Tracking als Forschungsmethode	115
8.3.2	Annahmen für Eye-Tracking-Studien	116
8.3.3	Funktionsweise von Eye-Tracking-Systemen	116
8.3.4	Merkmale zwischen Expert:innen und Noviz:innen . .	117
8.3.5	Areas of Interest und Metriken von Eye-Tracking-Daten	118
8.4	Forschungsgegenstand: Entwicklung und Auswertung der Eye-Tracking-Studie	120
8.4.1	Verwendete Materialien	120
8.4.2	Entwicklung: Python-Skript für die Datenvorbereitung und -bereinigung	121

8.4.3	Teilnehmende der Studie	122
8.4.4	Auswertung der Verweildauer – Heatmap	124
8.4.5	Auswertung der Fixationsfrequenz – AOI-Zeit-Diagramm	125
8.4.6	Auswertung der Scanpfade – Stringvergleich	127
8.5	Zusammenfassung und Reflexion	132
8.5.1	Zusammenfassung	132
8.5.2	Reflexion: Störvariablen	133
III	Abschnitt III - Summative Evaluation	136
9	Wirksamkeitsanalyse der mobilen AR-App	137
9.1	Forschungsfragen und Hypothesen	138
9.2	Forschungsdesign	139
9.3	Verwendete Materialien	141
9.3.1	Messinstrumente	141
9.3.2	Intervention	142
9.4	Statistische Auswertung	144
9.4.1	Auswertungstools und Messverfahren	144
9.4.2	Reliabilitätsprüfung der Messinstrumente	146
9.4.3	Deskriptive Statistik	148
9.4.4	Allgemeines lineares Modell	152
9.4.5	Weitere Untersuchungen	159
9.4.6	SUS, UEQ und Freitextantworten	162
9.5	Zusammenfassung und Diskussion	166
10	Zusammenfassung und Ausblick	167
10.1	Zusammenfassung	167
10.1.1	Abschnitt I: Problemstellung und Literatur	167
10.1.2	Abschnitt II: Mikrozyklen	169
10.1.3	Abschnitt III: Summative Evaluation	171
10.2	Ausblick und Reflexion	172
Literaturverzeichnis		176
Eigene Publikationen		203

IV Anhang		I
I	Anhang zu Abschnitt 1	II
I.1	Interviewleitfaden für die Besprechung mit Laboringenieuren und wissenschaftlichen Mitarbeitenden	II
I.2	Protokoll vom 15.06.2015 mit allen beteiligten Laboringenieuren, wissenschaftlichen Mitarbeitenden, Professor:innen und Studierenden der Fachschaft Elektrotechnik	III
I.3	Workshop-Ergebnisse: Ziele der einzelnen Praktika und jeweiligen Versuche	IV
I.4	Übersicht der Praktika mit den jeweiligen beteiligten Fachbereichen an der Universität Paderborn und den jeweiligen Versuchen. Stand: 2017	VI
I.5	Übersicht der Forschungsarbeiten und Studien, sowohl veröffentlichte, als auch unveröffentlichte	VII
I.6	Tabellen zur qualitativen Literaturauswertung	VIII
II	Anhang zu Abschnitt 2	XIV
II.1	Codeauszüge zur Realisierung des Oszilloskops und Funktionsgenerators in Python	XIV
II.2	Überblick über die entwickelten Prototypen: Darstellungs- bzw. Nutzungsform, genutzte SDKs, und Schwerpunkt .	XXI
II.3	Konkretisierte Lernziele	XXII
II.4	Fragebogen zur Onboarding-Studie	XXVI
II.5	Unterlagen zur Eye-Tracking-Studie	XXVIII
II.6	Aufgabe am realen Oszilloskop	XXVIII
II.7	Interview-Fragebogen für Expert:innen	XXIX
II.8	Interview-Fragebogen für Anfänger:innen	XXX
II.9	Leitfaden zur Durchführung	XXXI
III	Anhang zu Abschnitt 3	XXXIII
III.1	Moodle Fragen zum Online-Test für die Gesamtevaluation	XXXIII
III.2	Fragebogen 1 zur Erfassung der affektiven Merkmale .	XLIII
III.3	Fragebogen 2 zur Bewertung der App	LIV
IV	Digitaler Anhang mit Verzeichnisstruktur	LXVII

Abkürzungsverzeichnis

- ANOVA** Analysis of Variances. xiv, 144, 161
- AO** analoge Oszilloskope. xiv, 62, 63
- AOI** Area of Interest. xiv, 116, 118, 119, 121, 122, 125–127, 130–132, 134
- AR** Augmented Reality. xiv, 2, 4
- ARLE** Augmented Reality Learning Environment. xiv, 33, 34
- AV** Augmented Virtuality. xiv, 22
- BIO** Biologie. xiv, 32
- CAGR** Compound Annual Growth Rate. xiv, 27
- CH** Chemie. xiv, 32
- CH1** Channel 1 (Bezeichnung des ersten Kanals bei Oszilloskopen). xiv
- CIW** Chemieingenieurwesen. xiv
- COVID-19** Coronavirus Disease 2019. xiv, 26
- CSV** Comma-Separated Values. xiv, 24
- DBR** Design-Based Research. xiv, 3
- DigiSelF** Digitalisierung als Herausforderung und Innovation in der Hochschul-
lehre. xiv
- DQR** Deutscher Qualifikationsrahmen. xiv
- DSO** digitale Speicheroszilloskope. xiv, 62

- E-Labor** Elektrotechnik-Labor. xiv, 19
- ECTS** European Credit Transfer and Accumulation System. xiv
- EG** Experimentalgruppe. xiv, 33, 34
- engl.** englisch. xiv, 4, 23, 32, 42, 50, 53, 61, 89, 90, 117–119, 121, 122, 128, 130, 131, 144, 145
- ET** Elektrotechnik. xiv, 32
- exp.** experimentelle. xiv, 137–141, 147, 148, 157–160, 166–168, 171, 172
- FFT** Fast Fourier Transform. xiv, 130
- GLM** General Linear Model. xiv, 145
- HAW** Hochschule für angewandte Wissenschaften. xiv
- HCI** Human-Computer Interaction. xiv
- HMD** Head Mounted Displays. xiv, 2, 32
- IDE** Integrated Development Environment. xiv
- IG** Interventionsgruppe. xiv, 139, 150, 154, 157
- IPW** Ingenieurspädagogischen Wissenschaftstagung. xiv, 23
- IR-Licht** Infrarot-Licht. xiv, 117, 134
- ISONORM 9241-110-S** International Organization for Standardization Norm 9241-110-S. xiv
- k. A.** keine Angabe. xiv
- KFP** Konferenz der Fachbereiche Physik. xiv, 12
- KG** Kontrollgruppe. xiv, 33, 34, 139, 143, 150, 154, 157, 171
- KMK** Kultusministerkonferenz. xiv

- l_b AR** location-based AR. xiv, 32
- LEDS** Light Emitting Diode. xiv, 143
- LMS** Learning Management System. xiv, 139
- MB** Maschinenbau. xiv
- mb AR** marker-based AR. xiv, 32
- MINT** Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik. xiv, 13
- ml AR** marker-less AR. xiv, 32
- MR** Mixed Reality. xiv, 22, 110, 135
- PEARL** Paderborner Elektrotechnik AR Laborpraktikum. xiv
- PHY** Physik. xiv, 32
- QR-Code** Quick Response Code. xiv, 75
- QUIS** Questionnaire for User Interaction Satisfaction. xiv
- RWTH** Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. xiv, 139, 149, 150
- SPSS** Statistical Package for the Social Sciences. xiv
- STF** sonstige technische Fächern. xiv
- SUMI** Software Usability Measurement Inventory. xiv
- SUS** System Usability Scale. xiv, 140, 142, 146, 148, 149, 162, 163
- Tab.** Tabelle. xiv, 130, 131, 146–148, 154, 156, 157, 161
- TU-DO** Technische Universität Dortmund. xiv, 139, 149, 150
- u. A.** und Andere. xiv

UEQ User Experience Questionnaire. xiv, 86, 94–96, 101–103, 107, 140, 148, 149, 163

UML Unified Modeling Language. xiv, 62

UX User Experience. xiv, 90

VISIR Virtual Instrument Systems in Reality. xiv

VR Virtual Reality. xiv, 2, 4, 135

Wing MB Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau. xiv

ZSB Zentrale Studienberatung. xiv

1.1 Motivation

Zu den zentralen Pflichtveranstaltungen naturwissenschaftlicher oder technischer Studiengänge gehören Laborpraktika. Sie dienen dazu, die bereits erlernten theoretischen Vorlesungsinhalte zu festigen, anzuwenden und in die spätere Berufspraxis zu transferieren. Darüber hinaus sollen Studierende das Experimentieren erlernen, um die wissenschaftliche Erkenntnismethodik zu verstehen und anzuwenden (z. B. [TMF20]). Sowohl im schulischen als auch im universitären Bereich werden Experimente weiterhin häufig nach „kochbuchartigen“ Anleitungen aufgebaut und durchgeführt [Pla17]. Studierende erhalten dabei meist nur eingeschränkt die Möglichkeit, Experimente eigenständig zu planen, aufzubauen und durchzuführen, wie sie z. B. beim forschenden Lernen verlangt wird [TMF20]. Stattdessen arbeiten sie oft mit vormontierten Versuchsaufbauten und übernehmen vorrangig kognitiv wenig anspruchsvolle Tätigkeiten, wie das Aufnehmen von Messwerten [Huc99; Tek+16]. Diese Vorgehensweise mindert nicht nur die Lerneffizienz, sondern auch die Motivation der Studierenden (z. B. [LT10] und [Pla17]).

Ferner mangelt es Studierenden oft an nötigen Vor- bzw. Grundkenntnissen im Umgang mit den im Praktikum zu nutzenden elektrotechnischen Bauelementen und Messgeräten [LKL17]. Da sie ihr Studium der Elektrotechnik in der Regel kurz nach der allgemeinen Hochschulreife beginnen, fehlt ihnen meist die Möglichkeit², vorab praktische Erfahrungen mit den verschiedenen Geräten zu sammeln (z. B. [LKL17]). Der Erwerb solcher Geräte ist meist mit hohen finanziellen Kosten verbunden, sodass die erste Begegnung damit häufig erst kurz vor oder während eines Versuchs und zumeist in Form einer kurzen Einweisung stattfindet. Trotz dieser kurzen Einführung, aufgrund des straffen Zeitplans, wird von den Studierenden erwartet, die Geräte zielgerichtet einzusetzen, um die Versuche in der gegebenen Zeit und unter Beobachtung von Laboringenieur:innen vorzubereiten und durchzuführen. Dieser Druck und die fehlende Einarbeitungsmöglichkeit führen daher oft zu Stress und kognitiver Überforderung sowohl vor als auch während eines Versuchs.

2 sofern nicht durch Schule, ein Hobby oder eine Ausbildung gegeben

Die Durchführung der einzelnen Versuche erfolgt in Gruppen, die aufgrund der begrenzten Ausstattung oder des zu hohen Betreuungsaufwands oft so groß sind, dass nur wenige Studierende tatsächlich die Möglichkeit haben, die Geräte zu bedienen. Ein weiteres Problem ist der Mangel an zeitlich flexiblen Laborangeboten, der an deutschen Hochschulen häufig auftritt (z. B. [Nac16]). Der sichere Umgang mit Laborgeräten bleibt jedoch eine zentrale Anforderung, sowohl im Studium als auch im späteren Berufsleben [Tek+16].

Um die genannten Probleme zu überwinden, kommen zunehmend Online-Labore zum Einsatz. Diese können unterteilt werden in Remote-Labore, bei denen reale Geräte über das Internet fernbedient werden (z. B. im **VISIR**³-Projekt), **Virtual Reality (VR)** Labore, die vollständig simulierte Umgebungen darstellen, sowie **Augmented Reality (AR)** Labore, welche reale Versuchsaufbauten um digitale Informationen erweitern [May+20]. Alle Formate zeichnen sich durch Kosteneffizienz, örtliche und zeitliche Flexibilität, Mehrfachzugriff und die Visualisierung sonst nicht sichtbarer Prozesse aus, während sie gleichzeitig Sicherheitsrisiken und Materialaufwand minimieren [May+20].

Ihrem Potenzial nach rückt Augmented Reality als besonders geeigneter Ansatz in den Fokus dieser Arbeit. Im Vergleich zu Remote-Laboren ermöglicht sie eine höhere Immersion, ohne dass eine aufwendige Server- oder Geräteinfrastruktur erforderlich ist. Gegenüber VR-Laboren entfallen zudem Risiken von *Motion Sickness* sowie die Anschaffung teurer VR-Brillen (Head Mounted Displays (**HMD**)) [HK16].

Daher verfolgt diese Dissertation das Ziel, die Vorbereitung auf Laborpraktika durch den Einsatz von AR neu zu gestalten, um den sicheren sowie zielgerichteten Umgang mit Laborgeräten zu erlernen. Durch die Nutzung mobiler Endgeräte lassen sich zudem kostspielige Anschaffungen vermeiden, während gleichzeitig die Bedienung von virtuellen Laborgeräten mittels natürlicher Gesten unterstützt werden soll.

³ Virtual Instrument Systems In Reality

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Struktur und Gliederung dieser Dissertation in Abschnitte orientieren sich am Makrozyklus des Prozessmodells von Euler (2014) (vgl. Abb. 1.1), ohne jedoch den Anspruch eines vollständigen *Design-Based Research (DBR)*-Ansatzes zu erheben.

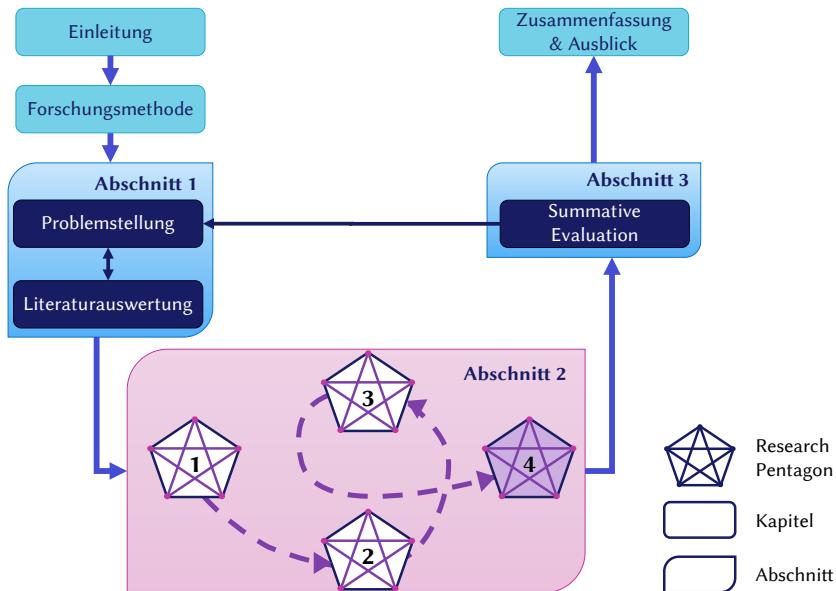


Abbildung 1.1: Gliederung der Arbeit in Anlehnung an die Phasen des DBR-Makrozyklus nach Euler (2014). Eigene Darstellung. [Eul14]

In Kapitel 2 wird die angewandte Forschungsmethode umfassend erörtert, wobei der Makrozyklus nach Euler als strukturgebender Rahmen dient und das Research Pentagon den zentralen Kern des Vorgehens bildet. Die Arbeit verfolgt damit nicht die typischen DBR-Mikrozyklen, sondern ist durch aufeinanderfolgende Research Pentagons strukturiert, die jeweils in sich abgeschlossen sind und neue Forschungsziele, -fragen, -methoden, -situationen und -gegenstände enthalten.

Angelehnt an den Makrozyklus umfasst der erste Abschnitt der Arbeit zwei Hauptkapitel, die das motivationale und wissenschaftliche bzw. literaturbasierte Fundament der Arbeit darstellen und von hoher Relevanz für das weitere Verständnis sind.

Das Kapitel 3 widmet sich einer detaillierten Betrachtung der Problematik der bestehenden Ausgestaltung der Laborpraktika, die bereits im Kapitel zur Motivation (1.1) angeschnitten wurde. Hier wird insbesondere die Struktur der Laborpraktika an der Universität Paderborn untersucht, wobei Herausforderungen und gegenwärtige Lösungsansätze ausführlich diskutiert werden.

In Kapitel 4 wird über die Literaturauswertung ein fundierter Überblick über Augmented - und Virtual Reality gegeben. Durch eine Kombination aus quantitativer und qualitativer Literaturanalyse werden bestehende AR-Lösungen untersucht, die speziell für die Vorbereitung auf Laborpraktika und im Besonderen für die Anleitung zur Gerätebedienung entwickelt wurden.

Der zweite Abschnitt umfasst die Kapitel 5 bis 8 und beschreibt die verschiedenen Stadien bei der Entwicklung der Maßnahme auf Basis sukzessiver Research Pentagons. Jedes Kapitel beginnt dabei mit einer visualisierten Ausfüllung des Pentagons, das als Advance Organizer dient und einen knappen Überblick über die Schwerpunkte des jeweiligen Kapitels bietet.

Kapitel 5 bietet eine kurze Einführung in Lerntheorien, das *Constructive Alignment* und die *Revised Bloom's Taxonomy*. Auf Basis dieser Theorien wird das didaktische Konzept der App entwickelt. Es definiert die jeweiligen Lernziele, Lernaktivitäten und Prüfungsmethoden, die anschließend auf theoretischer Ebene evaluiert werden. Sowohl die Lernziele, als auch die -aktivitäten sind umfangreich und decken die verschiedenen Laborgeräte und elektrotechnischen Bauteile ab, die im Grundlagenpraktikum relevant sind.

Mit dem Fokus auf Lernziele zum Oszilloskop wird in der Machbarkeitsstudie (Kapitel 6) zunächst die technische Funktionsweise eines Analog-Oszilloskops erläutert und in mehreren Abstraktionsstufen exemplarisch auf Softwareebene in der Programmiersprache Python modelliert. Auf dieser Grundlage analysiert die Entwicklung kleinerer Prototypen, in welcher Phase und auf welche Weise eine AR- oder VR-Anwendung im Praktikum unterstützend eingesetzt werden kann. Das Ziel besteht darin, den Fokus für die weitere Entwicklung der App festzulegen, insbesondere durch die Auswahl der Entwicklungsumgebung und der zugrunde liegenden Technologie.

Um den Einstieg in die AR-App zu erleichtern, analysiert Kapitel 7 verschiedene *Onboarding*-Ansätze, sowohl auf theoretischer, als auch auf praktischer Ebene. Die erste Version der App orientiert sich daher an praxisbasierten Designrichtlinien und wird als schrittweise Anleitung umgesetzt. Die Evaluation erfolgt durch einen Fragebogen zur Benutzerfreundlichkeit (englisch *Usability*) und -erfahrung (engl. *User Experience*).

Zum Zweck der Gesamtevaluation der Maßnahme führt Kapitel 8 das Eye-Tracking-Verfahren als Messinstrument ein und erläutert die zugrunde liegenden Annahmen sowie die methodischen Grundlagen für entsprechende Studien. Im Rahmen eines Expert:innen-Noviz:innen-Vergleichs analysiert die Studie, ob sich aus den Metriken der Eye-Tracking-Daten charakteristische Merkmale identifizieren lassen. Diese sollen es ermöglichen, den Umgang und die Kompetenz bei der Bedienung eines Oszilloskops zu bewerten.

Im dritten Abschnitt der Arbeit, Kapitel 9, erfolgt eine summative Evaluation der Maßnahme. Hier werden die zentralen Forschungsfragen und -hypothesen formuliert sowie ein geeignetes Forschungsdesign vorgestellt. Die Studie wird an zwei Universitäten durchgeführt, und die erhobenen Daten werden ausführlich analysiert und interpretiert.

Kapitel 10 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse und einem Ausblick auf zukünftige Entwicklungen ab. Dieser umfasst die Weiterentwicklungen der App auf Mixed Reality Brillen, einen erweiterten Funktionsumfang der bisherigen Geräte sowie Integration neuer 3D-Modelle.

In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen beschrieben, das der Entwicklung der AR-App, aber auch der gesamten Struktur dieser Dissertation zugrunde liegt. Der Makrozyklus des Prozessmodells von Design-Based Research nach Euler (2014) dient als strukturgebender Rahmen, das Research Pentagon bestimmt als methodisches Vorgehen die Durchführung auf der Mikroebene.

2.1 Definition des Research Pentagons

Das Research Pentagon oder auch Forschungsfünfeck (vgl. [RB21]) stellt ein analytisches Modell dar, das eine strukturierte Herangehensweise an Forschungsprojekte ermöglicht. Es wird verwendet, um die verschiedenen Komponenten zu veranschaulichen, die bei der Planung und Durchführung von Forschungsvorhaben berücksichtigt werden sollten, nämlich dem *Forschungsziel*, der *Forschungsfrage*, der *Forschungsmethode*, der *Forschungssituation* und dem *Forschungsgegenstand*.

Obwohl die einzelnen Komponenten voneinander getrennt sind, lassen sie sich in der Praxis schwer voneinander isoliert betrachten. Sie weisen eine enge Wechselwirkung auf, was durch die Diagonalen in der Abb. 2.1 visualisiert ist. Das bedeutet ferner, dass die Änderung einer Komponente auch die Sicht oder Änderung anderer Komponenten mit sich führen kann [Bik19].

2.2 Komponenten des Research Pentagons

Im Folgenden werden die fünf Komponenten des Research Pentagons, wie sie in Abb. 2.1 dargestellt sind, näher erläutert:

- **Forschungsgegenstand:** Forschung startet oftmals mit einem Forschungsgegenstand, der aufgrund seiner „Unvollständigkeit“ Anlass bzw. Grundlage für eine weiterführende Untersuchung bietet [Rei11] (vgl. auch [Bik19]). Er legitimiert das Forschungsvorhaben und hat sowohl einen erkenntnisorientierten (epistemischen) als auch praxisbezogenen Charakter. Einer-

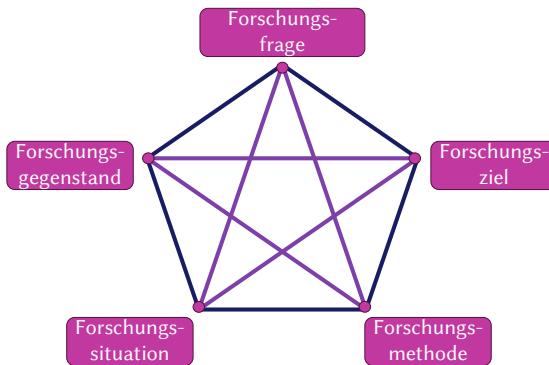


Abbildung 2.1: Research Pentagon mit den fünf Hauptkomponenten von Forschungsvorhaben. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Bik19]

seits schließt er eine Forschungslücke, andererseits hilft er, praxisrelevante Probleme zu lösen, die durch gesellschaftliche Veränderungen oder Reformen in Bildungseinrichtungen entstehen können [Bik19]. Der Forschungsgegenstand ist mit am schwierigsten zu definieren, da er einerseits sehr präzise und konkret formuliert sein muss, um ihn im weiteren Verlauf untersuchen zu können, aber dennoch genug Spielraum für Generalisierbarkeit bieten und übertragbar sein sollte.

- **Forschungsziel:** Das Forschungsziel leitet sich aus der Unvollständigkeit des Forschungsgenstands ab und begründet dessen Relevanz für eine wissenschaftliche Untersuchung [Bik19].
- **Forschungsfrage:** Die Forschungsfrage gibt dem Forschungsvorhaben eine klare Richtung und kann sich entweder aus dem Forschungsziel ableiten oder dieses direkt formulieren [Bik19]. Ein Forschungsziel kann auch mehrere Forschungsfragen umfassen, insbesondere wenn es sich um ein übergeordnetes Ziel handelt, das in verschiedene Teilespekte gegliedert ist.
- **Forschungsmethode:** Die Forschungsmethode muss zur Forschungsfrage passen und sollte durch qualitative und/oder quantitative Methoden zur Klärung dieser beitragen. Ferner sollte sie die Forschungssituation berücksichtigen, da bestimmte Forschungssituationen nicht alle Forschungsmethoden erlauben, etwa ein Kontrollgruppendesign in einer Schulkasse.

- **Forschungssituation:** Die Forschungssituation setzt sich aus einer externen und einer internen Komponente zusammen. Erstere charakterisiert sich durch Diskurse in Konferenzen oder Erarbeitung von Literatur; letzteres stellt die Situation dar, in der die Forschung stattfindet.

2.3 Einordnung und Abgrenzung zu Design-Based Research

Design-Based Research entstand Anfang der 1990er-Jahre als Reaktion auf das Spannungsfeld zwischen Theorie und Praxis in der Bildungsforschung [SW22]. Häufig stehen Wissenschaftler:innen und Praktiker:innen einander skeptisch gegenüber: Während erstere den Nutzen praxisnaher Forschung infrage stellen, betrachten letztere universitäre Forschung oft als zu theoretisch [SW22]. DBR versucht diese Lücke zu schließen, indem Lernphänomene nicht im Labor, sondern in realen Bildungskontexten untersucht werden [Rei05; SW22]. Zentrale Merkmale von DBR sind die enge Zusammenarbeit zwischen Forschenden und Praxisbeteiligten sowie ein interventionsorientiertes und iteratives Vorgehen.

Das Prozessmodell nach Euler [Eul14, 19ff.] gliedert DBR in sechs Phasen: Ausgangspunkt ist ein praxisrelevantes Problem, gefolgt von einer theoretischen Fundierung durch Literaturarbeit. Darauf bauen Design, Erprobung und Evaluation von Prototypen auf, die in einem zyklischen Verfahren (Makrozyklus) weiterentwickelt werden. Ziel ist es, durch wiederholte Iterationen einer Intervention Gestaltungsprinzipien zu generieren, die sowohl praktischen Nutzen als auch theoretische Erkenntnisse liefern [Rei11].

Diese Dissertation nutzt den Makrozyklus nach Euler als übergeordneten Rahmen, erfüllt jedoch die typische Logik von DBR auf Mikroebene nicht. Klassische DBR-Studien beruhen auf iterativen Zyklen, in denen dasselbe Design mehrfach verfeinert wird. In der vorliegenden Arbeit hingegen übernehmen eigenständige Research Pentagons diese Rolle. Jedes Pentagon bildet einen abgeschlossenen Forschungszyklus mit eigenen spezifischen Forschungsfragen, -zielen, -methoden etc.. In der Abfolge werden die Pentagons spiralförmig immer spezifischer: vom breiten didaktischen Konzept über die Machbarkeitsstudie bis hin zum fokussierten Onboarding und dem Exkurs zum Eye-Tracking (vgl. Abb. 2.2).

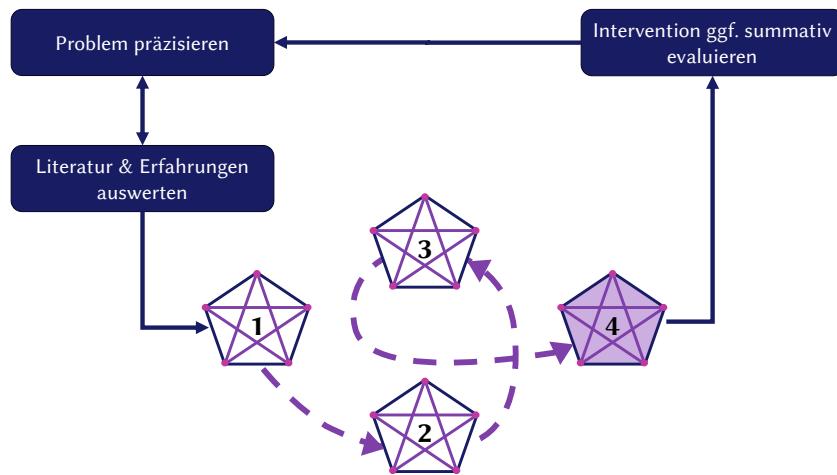


Abbildung 2.2: Eigenständige und in sich abgeschlossene Research Pentagons, dargestellt als Spirale im Makrozyklus von DBR. Mit 1 = Didaktisches Konzept, 2 = Machbarkeitsstudie, 3 = Onboarding und 4 = Exkurs: Eye-Tracking als Messinstrument. Quelle: Eigene Darstellung

Durch die wiederholte Anwendung des Pentagons entsteht eine Forschungsspirale, die maßgeblich zur Qualität und Aussagekraft der Forschung beiträgt und die Gültigkeit der erzielten Ergebnisse erhöht [RB21]. Zudem ermöglicht es einen konsistenten und transparenten Forschungsprozess zu gestalten und die Ergebnisse besser zu kommunizieren. Eine Übersicht über alle durchgeführten Forschungsarbeiten und Studien findet sich im Anhang S. VII der Arbeit.

In den nächsten beiden Kapiteln werden die ersten Schritte des an Euler (2014) orientierten Makrozyklus thematisiert: die Spezifizierung des Problems (Kapitel 3) sowie die Auswertung der Literatur zu Augmented Reality (Kapitel 4). Diese beiden Kapitel bilden den ersten Abschnitt der Arbeit und sind von zentraler Bedeutung, da sie die Grundlage und Legitimation für die Entwicklung der Lehrinnovation schaffen.

Abschnitt I - Grundlagen

In diesem Kapitel sind die allgemeinen Ziele und die Bedeutung von praktischen Laborarbeiten dargestellt, mit besonderem Fokus auf die derzeitige Ausgestaltung der Praktika an der Universität Paderborn. Dabei werden die Rahmenbedingungen erläutert und eine Übersicht über die derzeit durchgeführten Versuche präsentiert.

3.1 Allgemeine Ziele und Bedeutung von Laborpraktika

Laborpraktika sind ein essenzieller Bestandteil technischer Studiengänge, da sie zu den wenigen Lehrveranstaltungsformen zählen, die praktische Kompetenzen fördern [Gle+15]. Sie ermöglichen Studierenden, theoretisches Wissen in realen Anwendungen zu erproben, technische Zusammenhänge besser zu verstehen und systematische Lösungsstrategien zu entwickeln. Im Kontext der universitären Ausbildung tragen Laborpraktika dazu bei, Studierende auf die Anforderungen in der beruflichen Praxis vorzubereiten, insbesondere in Bezug auf das eigenständige Arbeiten in Labor- und Forschungsteams (z. B. [May+13] oder [Bau23]).

„[...] by the use of laboratory equipment in teaching the students have the opportunity to get into contact with the physical equipment of their future professional life as well as to make practical and theoretical experiences with equipment, methods and processes of empirical research.“ [May+13, S. 336]

Die Relevanz von Laborpraktika zeigt sich insbesondere in der engen Verknüpfung von Theorie und Praxis und der Möglichkeit Kompetenzen wie Problemlösung, Verantwortung und Innovation zu fördern [May+13]. Neben dem Umgang mit Messgeräten und Technologien steht die Interpretation und Aufbereitung experimenteller Ergebnisse im Fokus [Bau+21]. Anders als im schulischen Kontext,

wo Experimente häufig vordefinierte Ziele verfolgen, sollen Studierende in universitären Praktika befähigt werden, selbstständig Hypothesen zu entwickeln, Experimente zu planen und erhobene Daten kritisch zu analysieren [Bau23; SB20]. In der Elektrotechnik umfasst dies den sicheren Umgang mit komplexen Messsystemen, die Simulation technischer Prozesse und die systematische Fehlersuche. Weiterhin fördern Laborpraktika die Problemlösefähigkeit, indem Studierende lernen, auf unerwartete Herausforderungen flexibel zu reagieren und ihre Methodik anzupassen. Somit werden nicht nur fachliche, sondern auch methodische und soziale Kompetenzen gefördert [Bau23].

Die Diskussion über Ziele und Kompetenzen, die in Laborpraktika gefördert werden sollen, wird seit mehreren Jahrzehnten intensiv geführt [TMF20], insbesondere im Bereich der Physik [Bau23]. Sowohl nationale als auch internationale Forschungsgruppen und Studien haben Zielkataloge entwickelt, welche die Anforderungen an experimentelle Fähigkeiten und methodische Kompetenzen präzise definieren [Bau23; TMF20].

So hat eine breit angelegte Studie des europäischen Forschungsprojekts „*Lab-work in Science Education*“ aus dem Jahr 1998 die Zielsetzungen von Lehrenden an Schulen und Universitäten für experimentelle Lernumgebungen in Biologie, Physik und Chemie zusammengefasst [Wel+98]. Die Lernziele beim Experimentieren sind wie folgt formuliert und Lernende sollen:

- A) Theorie und Praxis miteinander verbinden können.
- B) Experimentelle Fähigkeiten erwerben.
- C) Methoden wissenschaftlichen Denkens kennenlernen.
- D) Motiviert werden, ihre Persönlichkeit und ihre soziale Kompetenz weiterzuentwickeln.
- E) Die Möglichkeit haben, ihr Wissen zu überprüfen.

Diese Ziele sind in spezifische Unterkategorien gegliedert, um die „Effektivität verschiedener Arten des Experimentierens für das Lernen zu liefern“ [Wel+98, S. 1].

Im Jahr 2010 ist mit Fokus auf den universitären Kontext aus der *Konferenz der Fachbereiche Physik (KFP)* eine detaillierte Liste von Kompetenzen für Bachelorstudierende entstanden [Bau23]. Aufgrund der methodischen und inhaltlichen

Nähe zwischen Physik und Elektrotechnik lassen sich viele dieser Zielsetzungen auf Laborpraktika in der Elektrotechnik übertragen [Bau23, S. 51f]:

- Die Studierenden sind mit den Grundprinzipien des Experimentierens vertraut.
- Die Studierenden beherrschen die Bedienung der üblichen Messgeräte.
- Die Studierenden sind in der Lage, moderne Messmethoden anzuwenden.
- Die Studierenden kennen die Funktionsweise und Genauigkeit verschiedener Messgeräte.
- Die Studierenden sind mit der computergestützten Messdatenerfassung vertraut.
- Die Studierenden können Messdaten richtig interpretieren.
- Die Studierenden können angemessene Fehlerabschätzungen ausführen und beherrschen die Berechnung der Fehlerfortpflanzung.

Aktuelle und weithin anerkannte Lernziele für ingenieurwissenschaftliche Labore gehen auf Feisel und Rosa (2005) zurück, die später von Felder und Brent (2016) für MINT⁴-Fächer weiter konkretisiert worden sind [TMF20]. Die nachstehende Übersicht fasst diese Lernziele in Anlehnung an Terkowsky et al. (2020) und in gekürzter und umformulierter Form zusammen [TMF20, 19f.].

Demnach sollen Studierende in der Lage sein ...

1. Experimente zu planen, durchzuführen und auszuwerten.
2. Geeignete Messinstrumente, Sensorik und Software auszuwählen und anzuwenden.
3. Daten methodisch korrekt zu analysieren, zu interpretieren und Messunsicherheiten zu berechnen.

4 *Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik (MINT)*

4. Die Anwendbarkeit und Grenzen theoretischer Modelle einzuschätzen.
5. Ursachen für Abweichungen zu identifizieren und Vorgehen oder Modelle anzupassen.
6. Ingenieurmäßige Konstruktionsprinzipien beim Aufbau von Apparaturen anzuwenden.
7. Kreative Ansätze zur experimentellen Problemlösung zu entwickeln.
8. Sicherheits-, Gesundheits- und Umweltaspekte zu berücksichtigen und verantwortungsvoll zu handeln.
9. Ergebnisse klar mündlich, schriftlich und visuell zu präsentieren und zu diskutieren.
10. Effektiv im Team zu arbeiten und gemeinsam Verantwortung zu übernehmen.
11. Methoden, Daten und Quellen vollständig und transparent zu dokumentieren.
12. Direkte Wahrnehmung und technische Sensorik zur Analyse einzusetzen.
13. Laborgeräte und Versuchsaufbauten sicher und zielgerichtet zu handhaben.

3.2 Strukturierung der Laborpraktika

Die obligatorischen Laborpraktika sind im Elektrotechnikstudium (Bachelor) der Universität Paderborn im zweiten bis vierten Semester verankert. Sie umfassen insgesamt sechs ECTS⁵ Punkte und werden von acht verschiedenen Fachgebieten betreut (vgl. Abb. 3.1).

In den Praktika absolvieren die Studierenden mehrere Experimente, die über verschiedene Experimentiertage verteilt sind. Sie sind in der Regel ein Semester zeitlich versetzt zu den Grundlagenvorlesungen des jeweiligen Fachbereichs angelegt, sodass die Inhalte auf den zuvor behandelten Stoff abgestimmt werden. Ein typischer Experimentiertag umfasst die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung eines Experiments, wobei die genaue Gestaltung je nach Fachbereich und Praktikum variiert.

⁵ European Credit Transfer and Accumulation System

BACHELOR-STUDIENVERLAUFSPLAN ELEKTROTECHNIK v4/v5					
1. SEMESTER 30 LP	2. SEMESTER 32 LP	3. SEMESTER 28 LP	4. SEMESTER 30 LP	5. SEMESTER 30 LP	6. SEMESTER 30 LP
Höhere Mathematik A (8 LP)	Höhere Mathematik B (8 LP)	Höhere Mathematik C (8 LP)	Stochastik für Ingenieure (5 LP)	Studium Generale (3 LP)	
Experimentalphysik für ET (6 LP)	Technische Mechanik für ET (6 LP)	Studium Generale (6 LP)	Feldtheorie (6 LP)	Elektromagnetische Wellen (6 LP)	
Grundlagen der Elektrotechnik A (8 LP)	Grundlagen der Elektrotechnik B (8 LP)	Energietechnik (4 LP)	Messtechnik (5 LP)	Nachrichtentechnik (5 LP)	Informations-technik WPV (6 LP)
	Werkstoffe (4 LP)	Halbleiterbauelemente (4 LP)	Signaltheorie (5 LP)	Schaltungstechnik (5 LP)	Mikrosystem-technik WPV (6 LP)
GP für Ingenieure II (6 LP)	GL der Techn. Informatik (4 LP)	GL der Rechnerarchitektur für ET (4 LP)	Systemtheorie (5 LP)	Regelungstechnik A (5 LP)	Automatisierungs-technik WPV (6 LP)
Projekt angew. Programmierung (2 LP)	Labor-praktikum A (2 LP)	Labor-praktikum B (2 LP)	Labor-praktikum C (2 LP)	IT o. MT o. AT WPV (6 LP)	Bachelorarbeit (12 LP)
	Projekt-Seminar (entweder im 2., 3., oder 4. Semester) (2 LP)				

Abbildung 3.1: Übersicht der Laborpraktika und der dazugehörigen Vorlesungsmodulen bzw. involvierten Fachbereiche. (Quelle: Überarbeitete Darstellung des Studienverlaufsplans zum Stand 2016, der zum Zeitpunkt der Workshops gültig war und die Grundlage für die Restrukturierung der Laborpraktika bildete.)

Die Abb. I.4 im Anhang (S. VI) fasst die einzelnen Versuche, die jeweils involvierten Fachbereiche der Universität Paderborn sowie die Inhalte der Experimente zum Stand von 2017 übersichtlich zusammen.

3.3 Herausforderungen der Laborpraktika

Zwischen den in Kapitel 3.1 beschriebenen Lernzielen und der tatsächlichen Durchführung der Laborpraktika besteht eine erhebliche Diskrepanz. Allgemeine Herausforderungen, wie der in Kapitel 1.1 thematisierte Ressourcenmangel, treten auch an anderen Universitäten häufig auf (z. B. [Nac16]). In Paderborn zeigen sich jedoch spezifische Probleme, die auf die Struktur und Organisation der Praktika (Kapitel 3.2) zurückzuführen sind.

Die Dezentralisierung der Laborpraktika auf unterschiedliche Fachbereiche hat zur Folge, dass die einzelnen Praktika nicht aufeinander abgestimmt sind. Aus Sicht der Studierenden wirken sie dadurch nicht wie ein einheitliches Samtkonzept, sondern wie voneinander unabhängige und zusammenhangslose Einzelpraktika⁶. Während der Gespräche⁷ im Juni 2016 und 2017 mit den involvierten Personen⁸ haben sich folgende Probleme herausgestellt:

- **Inkonsistenz in den Vorbereitungsmaterialien:** Sowohl der Umfang als auch die Art des Materials variieren stark. Sie reichen von ganzen Skripten mit bis zu 40 Seiten bis zu keinerlei Unterlagen. Zudem fehlt eine einheitliche Gliederung der Materialien, die die Vorbereitung auf die jeweiligen Experimente vereinfachen würde.
- **Unterschiedliche Ansprüche bei Umfang, Ausgestaltung und Durchführung:** Während einige Experimente sich auf das reine Aufnehmen und Visualisieren von Messwerten beschränken, erfordern andere eine eigenständige Planung und Durchführung. Dabei sind die Experimente aber nicht im Sinne einer stufenweisen Kompetenzförderung aufeinander abgestimmt. Vielmehr spiegeln die Unterschiede in den Anforderungen vorwiegend die individuellen Ansprüche der Betreuenden wider. Dies führt zu einem stark unterschiedlichen Vorbereitungs- und Durchführungsaufwand.
- **Unterschiede bei der Nachbereitung:** Der Umfang der Nachbereitung in Form von Praktikumsberichten variiert ebenfalls sehr stark zwischen den einzelnen Fachbereichen. Bei einigen Versuchen müssen stark strukturierte Berichte mit vordefinierten Feldern für Messwerte und Grafiken eingereicht werden, während die Berichtspflicht in anderen Fachbereichen völlig entfällt. Dies führt zu einem variierenden (Mehr-)Aufwand für die Studierenden und erschwert die Planung im Verlauf von Studium und Prüfungen, was häufig Unzufriedenheit hervorruft.
- **Heterogene Laborausstattung:** In den Fachbereichen kommen zahlreiche Geräte verschiedener Hersteller und Modelle zum Einsatz. Obwohl die Grundausstattung aus Vielfachmessgeräten und Oszilloskopen besteht, erschwert die Vielfalt an Herstellern und Modellen den Einstieg in das

⁶ vgl. Protokoll mit allen beteiligten Akteuren vom 15.06.2015 im Anhang S. III

⁷ Interviewleitfaden im Anhang S. II

⁸ alle Betreuenden der Laborpraktika und Studierendenvertreter:innen aus der Fachschaft Elektrotechnik

Praktikum, da die Bedienoberflächen und Bedienkonzepte stark variieren. In einigen Fällen besteht ein Experiment ausschließlich aus Programmieraufgaben; in anderen wiederum werden vermeintlich komplexe Geräte eingesetzt, deren Bedienung die Studierenden häufig vor Herausforderungen stellt. Zudem haben die Studierenden nicht in allen Versuchen die gleichen Freiheiten bei der Nutzung der Geräte, was zu einer Unsicherheit oder Scheu vor der Bedienung führt.

- **Fehlender „roter Faden“:** Die Studierenden bemängeln, dass die Laborpraktika, aber auch die einzelnen Versuche voneinander isoliert wirken und nicht aufeinander aufbauen. Erlerntes Wissen werde in späteren Versuchen nicht wieder aufgegriffen, wodurch es leicht in Vergessenheit gerate. Diese Wahrnehmung spiegelt sich auch in der tatsächlichen Ausgestaltung und den Inhalten der einzelnen Versuche wider. Auch den Betreuenden ist unklar, welche Kompetenzen sie aus vorherigen Praktika voraussetzen können. Daher werden in vielen Versuchen grundlegende Kenntnisse, wie die Bedienung eines Oszilloskops, häufig erneut vermittelt.
- **Hoher Arbeitsaufwand:** Der zeitliche und arbeitsbezogene Aufwand steht oft in keinem Verhältnis zu den für die Praktika angesetzten ECTS-Punkten. Diese Diskrepanz veranlasst viele Studierende, den Aufwand gering zu halten, indem sie sich nicht oder nur unzureichend vorbereiten. Gleichzeitig werden die Laborpraktika aufgrund der geringen ECTS-Punkte als weniger wichtig wahrgenommen, wodurch negative Leistungen häufig durch bessere Ergebnisse in anderen Modulen kompensiert werden sollen.
- **Fehlende Transparenz bei der Bewertung:** Ein weiteres zentrales Problem stellt die fehlende Transparenz bei der Bewertung dar. Für die Studierenden ist unklar, welche Arbeiten wie stark in die Gesamtnote einfließen. Dies betrifft insbesondere die Gewichtung von Praktikumsberichten, Vorbereitungsaufgaben und der eigentlichen Versuchsdurchführung. Zusätzlich bleibt offen, wie Gruppen- und Individualleistungen bewertet werden, was bei der Zusammenarbeit in Teams oft zu Unklarheiten, Frustration und einer geminderten Motivation führt.

3.4 Maßnahmen und Entwicklungen zu den Laborpraktika

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Probleme und der damaligen Ausgestaltung der Pflichtpraktika ist unter der Leitung des Fachgebiets Technikdidaktik in Zusammenarbeit mit Vertreter:innen der Physikdidaktik eine interdisziplinäre Arbeitsgruppe entstanden. Diese setzt sich aus wissenschaftlichen Mitarbeitenden, Laboringenieuren, Vertreter:innen der Studierendenschaft sowie Professor:innen der beteiligten Fachbereiche zusammen.

In regelmäßigen Workshops, die seit Dezember 2018 stattfinden, konkretisiert die Arbeitsgruppe die allgemeinen Ziele (Kapitel 3.1) und passt sie an die Laborpraktika der Universität Paderborn an. Die daraus abgeleiteten Kompetenzanforderungen sind für jedes Praktikum (A, B und C) sowie für die einzelnen Experimente detailliert ausgearbeitet und im Anhang (S. IV) dokumentiert. Dadurch wird ermittelt, welche Kompetenzen ausgelagert oder vorausgesetzt und welche in den jeweiligen Phasen eines Praktikums entwickelt werden sollen. Auf dieser Grundlage bilden sich mehrere kleinere Arbeitsgruppen, die an verschiedenen Maßnahmen zur Restrukturierung der Laborpraktika arbeiten, wie sie in der folgenden Abb. 3.2 veranschaulicht sind.

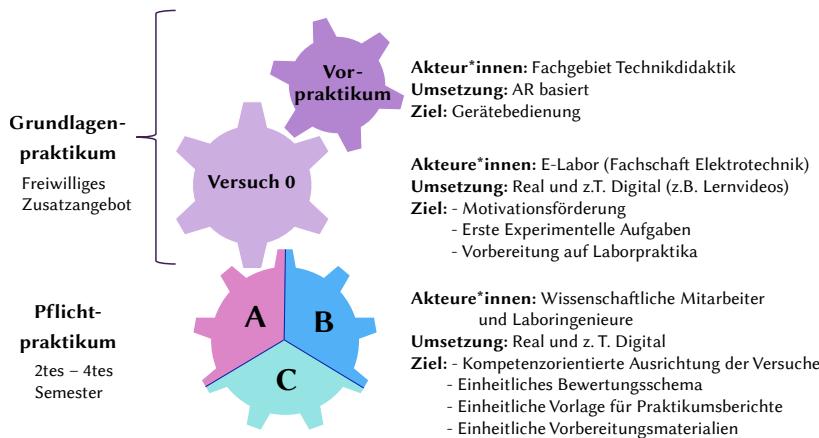


Abbildung 3.2: Arbeitsgruppen mit den jeweiligen Tätigkeitsschwerpunkten und Zielen für die Neukonzeptionierung der Elektrotechnik-Laborpraktika

Die Arbeitsgruppe, bestehend aus Laboringenieur:innen und wissenschaftlichen Mitarbeitenden der beteiligten Fachbereiche, konzentriert sich auf die Umstrukturierung und Neugestaltung der Praktika A bis C, mit dem Ziel, diese kompetenzorientiert auszurichten. Zu Beginn sollen grundlegende Kompetenzen erlernt werden, die in späteren Versuchen vertieft und erweitert werden. Mit jedem Versuch steigt nicht nur das geforderte Kompetenzniveau, sondern auch der Grad an Eigenständigkeit bei der Planung, Durchführung und Bewertung der Experimente. Im Rahmen der Workshops sind vereinzelte Experimente gekürzt oder umstrukturiert worden, etwa die Vorverlagerung der Versuche zur Energietechnik vom Laborpraktikum C in das Praktikum A, um die Motivation der Studierenden für Experimente zu erhöhen.

Im ausgelagerten Grundlagenpraktikum, das auf freiwilliger Basis angeboten wird, werden die grundlegenden Kenntnisse für das Experimentieren vermittelt. In Zusammenarbeit mit dem *Elektrotechnik-Labor (E-Labor)* der Fachschaft Elektrotechnik sind einheitliche Aufgaben und Vorbereitungsmaßnahmen entstanden, um den Studierenden das Arbeiten an den Laborgeräten zu vermitteln bzw. aufzufrischen. Im *Versuch 0* des E-Labors soll nicht nur die Motivation für die Elektrotechnik allgemein gefördert, sondern die Freude am Experimentieren im Speziellen geweckt werden. Zu diesem Zweck können Studierende in Zweiergruppen aus je maximal drei Personen einfache Schaltungen aufbauen sowie praktische Lötaufgaben und angeleitete Experimente durchführen.

Das Angebot wird von den Studierenden in Anspruch genommen, jedoch stellen die Öffnungszeiten und der hohe Betreuungsaufwand große Hürden dar. Besonders in den ersten Semestern können sie aufgrund dieser Einschränkungen das Experimentieren im Labor nur schwer in ihren Studienalltag integrieren. Daher ist im Rahmen dieser Dissertation das Vorpraktikum entstanden, das ebenfalls Teil des Grundlagenpraktikums darstellt und auf freiwilliger Basis erfolgt. Es bietet den Studierenden die Möglichkeit, zeitlich und örtlich flexibel den Umgang mit Laborgeräten zu erlernen. Die Umsetzung als AR-App namens **PEARL**⁹ ermöglicht zudem eine intuitive und praxisnahe Einarbeitung in die Bedienung der Geräte, was den Lernprozess realistischer und zugänglicher gestaltet.

In den Interviews und Workshops ist hauptsächlich das Oszilloskop als besonders anspruchsvolles und weniger vertrautes Laborgerät genannt worden (vgl. Anhang S. IV). Daher herrscht Konsens darüber, dass die Entwicklung und Implementierung des Oszilloskops, wenn auch nicht ausschließlich, so doch

⁹ *Paderborner Elektrotechnik AR Laborpraktikum*

vorrangig im Mittelpunkt des Vorpraktikums stehen sollten. Obwohl im ersten Research Pentagon, dem didaktischen Konzept, weitere Laborgeräte und Bauteile einbezogen sind, richtet sich der Fokus dieser Dissertation sowie der Gesamtevaluation hauptsächlich auf das Oszilloskop. Es wird daher ab Kapitel 7 vertieft behandelt.

Bevor eine eigene AR-basierte Lösung als Vorpraktikum entwickelt wird, gilt es zu prüfen, welche Arbeiten und Anwendungen bereits vorliegen und in welcher Form diese das Erlernen von Grundkompetenzen an Laborgeräten unterstützen. Kapitel 4 widmet sich dieser Bestandsaufnahme auf Basis quantitativer und qualitativer Literaturanalysen.

4

Literatuauswertung: AR Grundlagen

Nachdem im vorherigen Kapitel 3 die Problemstellung detailliert beschrieben ist, konzentriert sich dieses Kapitel auf die aktuelle Forschungslage zu AR und VR im Kontext von Laborpraktika. Nach einer Definition dieser Technologie wird durch eine umfassende Literaturrecherche ermittelt, welche VR- und AR-Lösungen bereits zur Unterstützung und Durchführung von Laborpraktika verfügbar sind. Die Analyse erfolgt sowohl quantitativ als auch qualitativ, wobei letztere den Einsatz zur Vorbereitung auf (elektro-)technische Laborpraktika fokussiert.

4.1 Definition und Geschichte zu AR

Nach Milgram und Kishino (1994) lässt sich Augmented Reality als Teil des *Reality-Virtuality-Continuum* verstehen, bei dem die reale Umgebung durch Einbettung virtueller Elemente erweitert wird. Dies geschieht entlang eines Spektrums, das von der reinen physischen Realität bis zur vollständig virtuellen Realität (VR) reicht (vgl. Abb. 4.1).

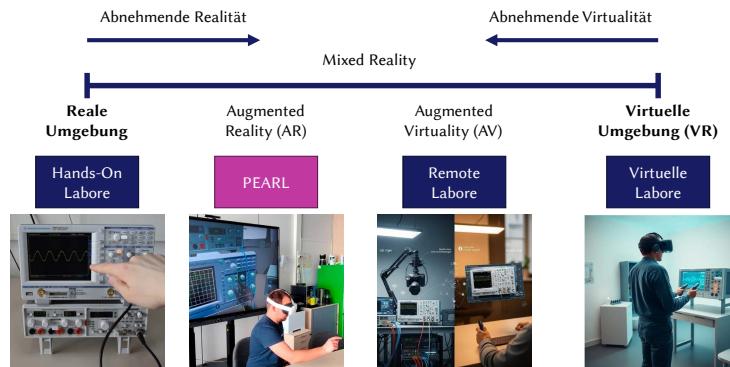


Abbildung 4.1: Reality-Virtuality-Continuum mit der realen Umgebung links und der vollständig virtuellen Umgebung rechts auf der Skala mit Fokus auf Laborpraktika. Eigene Darstellung nach [MK94]

Alle Ausprägungen zwischen den beiden Endpunkten werden als *Mixed Reality (MR)* bezeichnet. Die Integration virtueller Objekte in das reale Sichtfeld charakterisiert AR, während sich *Augmented Virtuality (AV)* umgekehrt auf virtuelle Umgebungen bezieht, die durch reale Elemente ergänzt werden.

Die Klassifikation der Labore entlang dieses Spektrums deckt sich mit Definitionen von Online-Laboren, die Virtualisierungsgrad, didaktische Ausrichtung sowie Zugänglichkeit der Ressourcen berücksichtigen [May+23]. Entsprechend reicht die Einordnung von klassischen Hands-on-Laboren über AR- und Remote-Labore bis hin zu vollständig simulationsbasierten Umgebungen (vgl. Abb. 4.2).

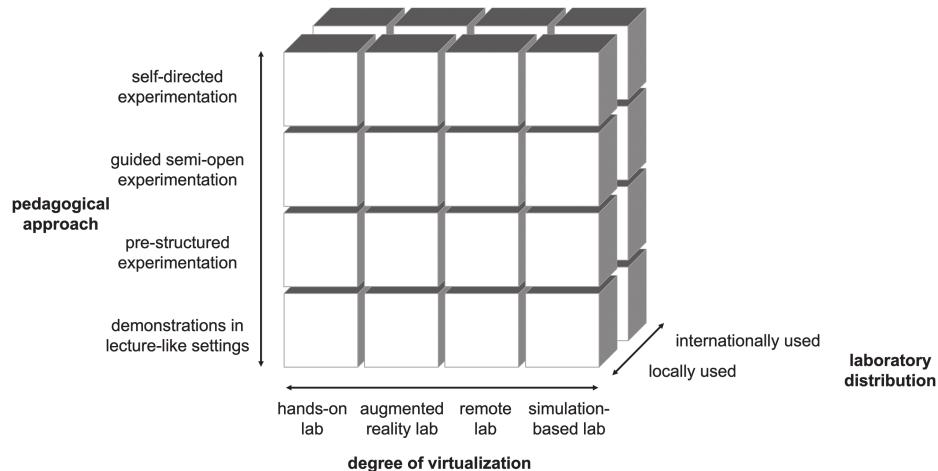


Abbildung 4.2: Modell zur Einordnung von Laboren entlang der Dimensionen Virtualisierungsgrad, pädagogischer Ansatz und Zugänglichkeit. Quelle: [May+23, S. 528]

Die Definition nach Milgram und Kishino (1994) zeigt, dass die Idee und das Konzept von AR und VR ebenso alt sind wie die Verbreitung erster Spielekonsolen und Computer und dass es bereits früh in der Pilot:innen- und Chirurg:innenausbildung zum Einsatz gekommen ist [Ola+15]. Trotz eines anfänglichen Höhenfluges konnte sich die Technologie wegen hoher Anschaffungskosten für Geräte einerseits und fehlender Anwendungen andererseits nicht durchsetzen und blieb ein Nischenprodukt. Erst der technologische Fortschritt, insbesondere im Bereich von mobilen Endgeräten und dem damit verbundenen Zugang zu preisgünstiger Hardware, hat AR wieder in das allgemeine Interesse gerückt [Klö21].

Mit der Möglichkeit, komplexe AR-Anwendungen auf handelsüblichen mobilen Endgeräten auszuführen und damit wesentlich mehr potenzielle Nutzende

anzusprechen, hat sich der Fokus stark zu einer anwendungsorientierten Sicht gewandelt. Neben dem kommerziellen Einsatz (z. B. in der Unterhaltungsbranche oder Marketing) ist der Anwendungsbereich insbesondere im Bildungswesen in den vergangenen sechs bis zehn Jahren enorm gestiegen, wie zahlreiche Studien und Publikationen verdeutlichen (vgl. z. B. [AA17]).

Die folgenden Kapitel bereiten diesen Entwicklungstrend auf quantitativer (Kapitel 4.3) und qualitativer Ebene (Kapitel 4.4) auf.

4.2 Datenerhebung

4.2.1 Methodisches Vorgehen

Um den Trend in der AR-Entwicklung zu untersuchen, wird zunächst in einem Mixed-Methods-Ansatz, bei dem quantitative und qualitative Forschungsmethoden kombiniert werden, eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt [Cre99]. Dies hilft, um ein ganzheitliches Bild der Nutzung von AR in naturwissenschaftlichen und technischen Laboren zu gewinnen. Der quantitative Teil besteht aus einer bibliometrischen Analyse mit Entwicklungstrends von AR, während der qualitative Teil durch eine systematische Literaturanalyse gekennzeichnet ist. Dazu werden Forschungspapiere (engl. *Paper*) und Projekte gesondert betrachtet und qualitativ analysiert, die AR in (Elektrotechnik-)Laborpraktika kontextualisieren. Der Fokus liegt in der Fragestellung, wie und in welchem Rahmen die AR-Anwendungen implementiert sind und wie sie evaluiert und in den wissenschaftlichen Publikationen reflektiert werden. Diese Vorgehensweise wird gewählt, da eine Auswertung auf Basis einer reinen Metadatenanalyse, wie bei einer bibliometrischen Analyse, nicht genügt, um genauere Erkenntnisse zu den einzelnen Anwendungen von AR zu gewinnen. Den Abschluss der qualitativen Analyse bildet die Untersuchung der Potenziale von AR und VR für den Einsatz in Laborpraktika. Es ist bewusst, dass AR auch entscheidende Grenzen und technische Probleme aufweist, wie z. B. das sogenannte *cognitive overload* Problem (vgl. z. B. [DDM09], [Wu+13] und [Rad16]). Diese sind in der Publikation auf der *Ingenieurspädagogischen Wissenschaftstagung (IPW)* im Mai 2017 herausgearbeitet und veröffentlicht worden (siehe hierzu [AT17]). Sie werden bei der Entwicklung der Anwendung weitestgehend berücksichtigt, aber hier nicht weiter erläutert.

4.2.2 Quantitative Literatursammlung

Für die bibliometrische Analyse wird die Datenbank *Lens* mithilfe eines *Web-crawlers*¹⁰ durchsucht und die Daten in einer CSV¹¹-Datei abgelegt. Die Suchparameter umfassen Artikel aus dem Zeitraum von 2010 bis 2023, wobei die folgende Kombination aus Schlüsselwörtern verwendet wird:

(TITLE: augmented) OR (TITLE: mixed) AND (TITLE: reality) AND
(YEAR_PUBLISHED: [2010 TO 2023]) AND (TYPE: Book AND Book Chapter
AND Conference Proceedings AND Conference Proceedings Article AND
Journal Article)

Die erste Suche im Januar 2024 ergibt 42.845 Treffer aus Kategorien wie Buch, Buchkapitel, Konferenzbeiträge und Fachartikel. Diese Einträge werden von Duplikaten und solchen Papieren bereinigt, die beispielsweise lediglich Zitationen darstellen, sodass ein finaler Datensatz von $N_{\text{quantitativ}} = 27.249$ entsteht. Der Datensatz wird in zwei Gruppen aufgeteilt: Gruppe A umfasst alle Dokumente, die keine expliziten Bildungsthemen behandeln, während Gruppe B solche beinhaltet, die Bildungsaspekte wie „*education*“, „*learn**“, „*teach**“ oder „*train**“ im Titel tragen. Für eine detaillierte Analyse werden die am häufigsten verwendeten Schlagwörter aus den Abstracts extrahiert, um die wichtigsten Kategorien der AR-Anwendungen zu identifizieren. Die produktivsten Länder, Institutionen und Autor:innen werden durch die Analyse von Zitationen und Anzahl Publikationen ermittelt.

4.2.3 Qualitative Literatursammlung

Für die systematische Literaturanalyse nach Xiao u. a. (2019) wird *Google Scholar* verwendet, da diese Plattform ohne die Verwendung eines Webcrawlers die umfangreichste Sammlung an Forschungspapern bietet [XW19]. Die Suche nach relevanten Studien mit AR im Laborkontext erfolgt unter Einsatz spezifischer Suchbegriffe und deren Kombinationen im Titel:

allintitle: (augmented OR mixed) AND reality AND lab*[oratory/oratories]

10 Bezeichnet ein Programm, das automatisiert Webseiten durchsuchen und gewünschte Inhalte extrahieren kann

11 *Comma-Separated Values (CSV)*: Textform zur Speicherung tabellarischer Daten, bei der Werte durch Trennzeichen wie Kommas oder Semikolons getrennt sind

Die Abb. 4.3 veranschaulicht die einzelnen Schritte der Datenbereinigung und die jeweils verbleibende Anzahl der Ergebnisse pro Schritt.

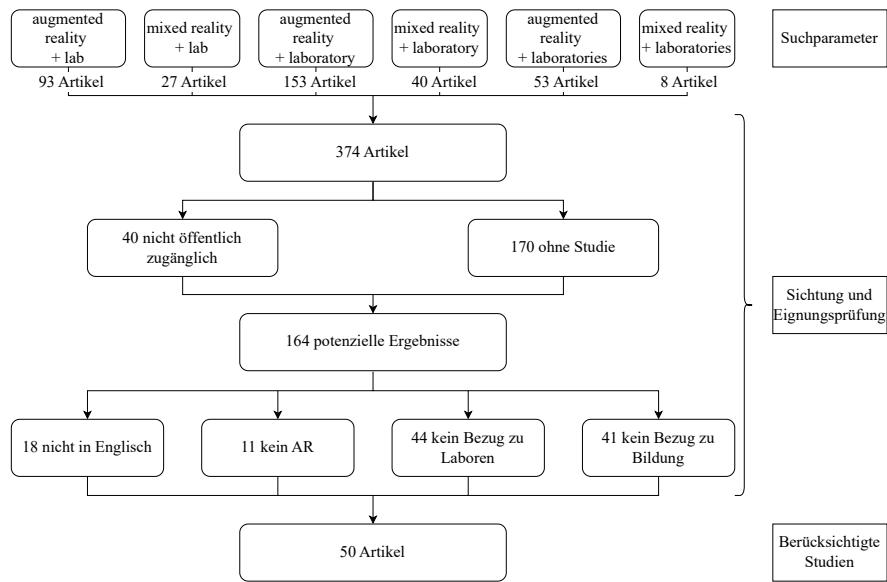


Abbildung 4.3: Schritte zur Sammlung und Bereinigung qualitativer Daten von Google Scholar mit der Anzahl der jeweiligen Datensätze. Datenerhebung im Januar 2024

Von insgesamt 374 Ergebnissen werden 164 Studien als potenziell relevant eingestuft. Nach dem Entfernen von Duplikaten sowie nicht englischsprachigen oder irrelevanten Publikationen verbleiben insgesamt 50 Studien für die weitere Analyse.

Die ausgewählten Arbeiten werden hinsichtlich der verwendeten AR-Geräte, der eingesetzten Technologien, der Art des Labors und der spezifischen Anwendung von AR analysiert. Zusätzlich werden, sofern vorhanden, positive und negative Ergebnisse der Studien dokumentiert, um ein umfassendes Bild der Effektivität und der Herausforderungen von AR in Laborumgebungen zu erhalten.

4.3 Quantitative Analyse und Auswertung zu AR in der Lehre seit 2010

Die quantitative Analyse verdeutlicht ein starkes Wachstum der AR-Forschung in den vergangenen Jahren. Die Referenzgruppe, die allgemeine AR-Themen abdeckt, erreicht im Jahr 2022 mit 2.954 Publikationen ihr Maximum, während die bildungsbezogene Forschung mit 1.137 Publikationen in 2023 ihren Höchstwert verzeichnet (vgl. Abb. 4.4).

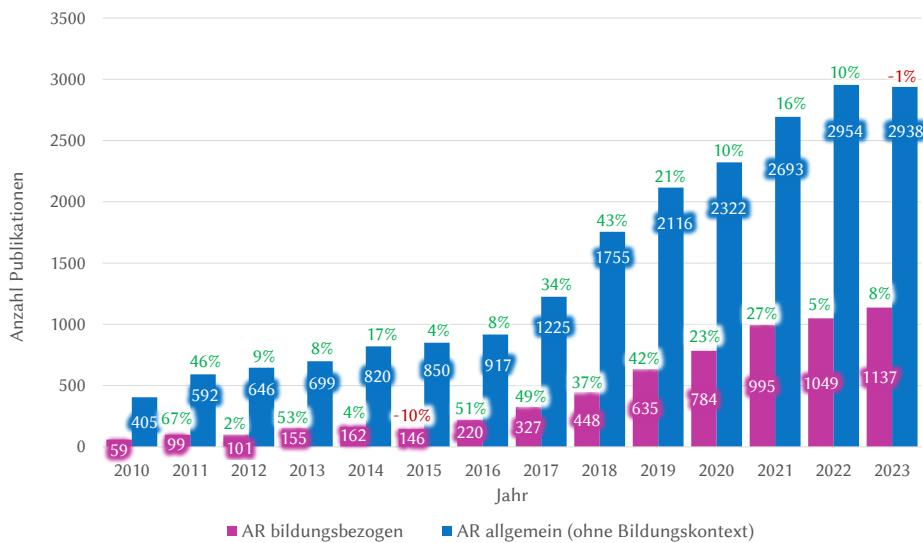


Abbildung 4.4: Anzahl der Veröffentlichungen sowie durchschnittlicher Zuwachs zum Vorjahr nach Jahr und Gruppe: allgemeine AR (Referenzgruppe) und bildungsbezogene AR

Es ist unklar, wie die globale COVID-19 Panemie ¹² Pandemie in den Jahren 2020 – 2022 diesen Trend beeinflusst hat. Einerseits kann die Notwendigkeit, digitale Technologien in den Bildungsbereich zu integrieren, als starker Katalysator für die Entwicklung von AR-Anwendungen fungieren. Dies ist besonders für die Arbeit im Labor interessant, da der Zugang hierzu stark eingeschränkt oder gänzlich unmöglich war. Andererseits erfordern AR-Anwendungen deutlich längere Planungen und Entwicklungszyklen als andere Lehrformate, wie der *Flipped Classroom*, die kurzfristig implementierbar sind.

¹² *Coronavirus Disease 2019 (COVID-19)*: Eine durch SARS-CoV-2-Virus verursachte Infektionskrankheit

Ungeachtet dieser temporären Einflussfaktoren verdeutlicht die *geometrische Durchschnittsrate des Wachstums*¹³ über die Jahre, dass Publikationen zu AR im Bildungsbereich deutlich stärker wachsen.

Die CAGR berechnet sich mit

$$\text{CAGR} = \left(\frac{W_{\text{Ende}}}{W_{\text{Start}}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

wobei W_{Start} den Anfangswert, W_{Ende} den Endwert und n die Anzahl der Jahre bezeichnet (z. B. [Ole22] oder [Way25]). Für den Zeitraum 2010 bis 2023 ergibt sich für die bildungsbezogene AR ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 27,35 %, während diese für allgemeine AR-Themen bei 17,19 % liegt. Gleichzeitig lässt sich anhand der jährlichen Wachstumsraten eine gewisse Sättigung erkennen, insbesondere in der Referenzgruppe, die im Jahr 2023 erstmals einen leichten Rückgang verzeichnet (vgl. Abb. 4.4).

Ein stetiges Wachstum zeigt sich auch in der Analyse der Autor:innen, die in den jeweiligen Jahren an mindestens einer Publikation beteiligt waren. In der bildungsbezogenen AR-Forschung erreicht die Beteiligung mit 4.464 Autor:innen im Jahr 2022 ihr Maximum, während in der Referenzgruppe die Zahl der Autor:innen in 2023 auf 10.201 ansteigt (vgl. Abb. 4.5).

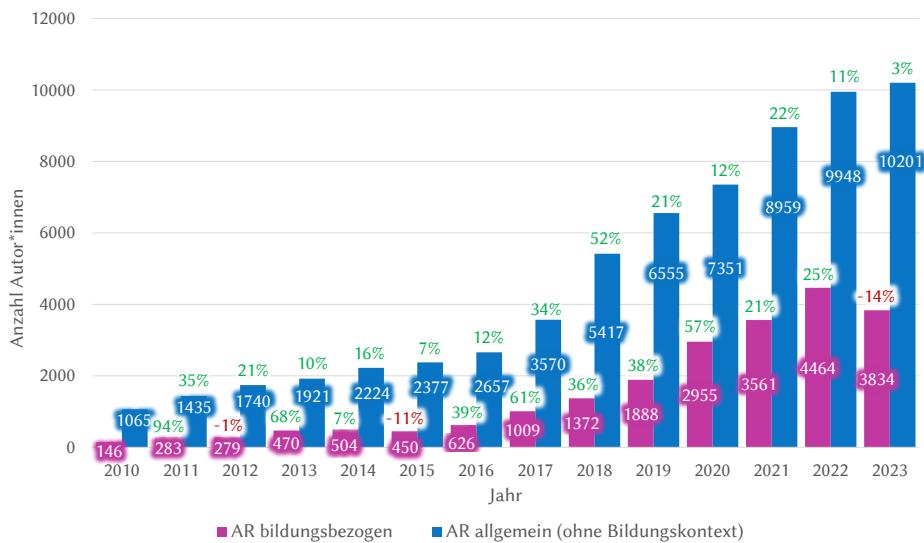


Abbildung 4.5: Anzahl der Autor:innen sowie durchschnittlicher Zuwachs zum Vorjahr nach Jahr und Gruppe, die über allgemeine AR-Themen (Referenzgruppe) und zu bildungsbezogener AR veröffentlicht haben

¹³ Compound Annual Growth Rate (CAGR)

Wie zuvor lassen sich deutliche Unterschiede in der CAGR erkennen: Mit 29,73 % wächst die Zahl der Autor:innen im bildungsbezogenen Bereich deutlich stärker als in der Referenzgruppe, die einen Wert von 19,51 % aufweist. Trotz des höheren absoluten Werts in der Referenzgruppe deutet das relative Wachstum auf eine zunehmende Relevanz von AR im Bildungskontext hin. Gleichzeitig ist auch hier eine Sättigung für beide Gruppen beobachtbar, wobei die bildungsbezogenen Autor:innen sogar einen Rückgang aufzeigen. Dies kann darauf hindeuten, dass ein vorläufiger Höhepunkt erreicht ist und sich das Forschungsfeld in eine Phase der Konsolidierung oder inhaltlichen Spezialisierung bewegt.

Die Metadaten ermöglichen die Identifikation der Institutionen und Länder, aus denen die Veröffentlichungen stammen, wie in Abb. 4.6 veranschaulicht. Aus den 3.159 Einträgen lassen sich 101 verschiedene Länder identifizieren. Die Vereinigten Staaten stehen mit 590 Publikationen an der Spitze, gefolgt von Indonesien (339), China (202), Malaysia (188), Taiwan (185), Deutschland (161), dem Vereinigten Königreich (160), Spanien (144), Australien (118) und Japan (101).

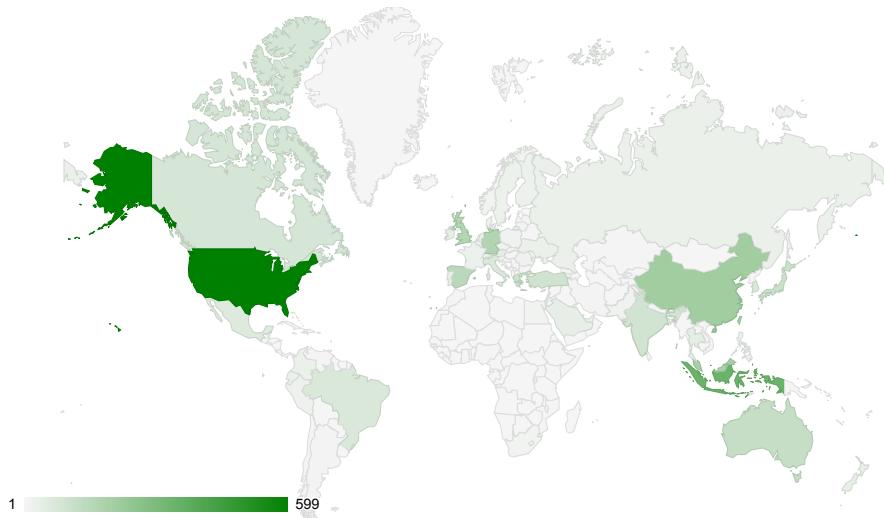


Abbildung 4.6: Geografische Verteilung der Länder mit der Häufigkeit der Veröffentlichungen seit 2010

Diese Ergebnisse unterstreichen die große Ungleichheit in der geografischen Verteilung der Forschungsaktivitäten und deuten darauf hin, dass sich die For-

schung auf einige wenige Länder konzentriert, was auch aus der Analyse der an den Publikationen beteiligten Institutionen bestätigt wird (vgl. Tab. 4.1).

Tabelle 4.1: Institutionen mit den meisten Veröffentlichungsbeteiligungen

Institution	Anzahl Publikationen
National Taiwan University of Science	2643
National Taiwan Normal University	1747
Harvard University	1451
Atatürk University	1062
University of Central Florida	872
Georgia Institute of Technology	772
Technische Universität München	702
University of Illinois at Urbana-Champaign	684
Arizona State University	671
University of Girona	632
Athabasca University	598
Charles III University of Madrid	593
Beijing Normal University	561
Radboud University Nijmegen	547
University of La Laguna	547
Universiti Teknologi Malaysia	521
National Taipei University of Education	514
University of California, Los Angeles	512
University of Alberta	451
University of the Aegean	425

Aus Abb. 4.7 ist ersichtlich, dass der Anteil der Autor:innen, die in früheren Jahren bereits AR-bezogene Arbeiten veröffentlicht haben, im Vergleich zu neu hinzukommenden Autor:innen sehr klein ist. Dies legt nahe, dass sich die Forschungsaktivitäten auf eine begrenzte Gruppe von Wissenschaftler:innen beschränken.

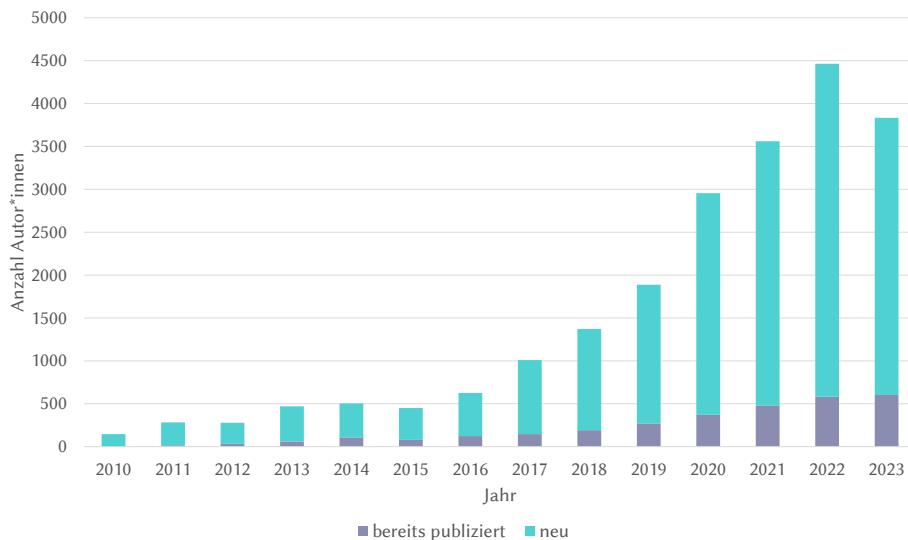


Abbildung 4.7: Verhältnis zwischen neuen und bereits etablierten Autor:innen, die in den Vorjahren mindestens eine AR-bezogene Arbeit veröffentlicht haben.

Werden in einem weiteren Analyseschritt die Anzahl Zitationen herangezogen, lassen sich damit die wichtigsten Autor:innen im Bereich AR identifizieren (vgl. Abb. 4.8). Zu den in den vergangenen Jahren (ab 2018) besonders häufig zitierten und damit prominenten Forschenden zählen Iulian Radu, Mark Billinghurst, Archana Mantri, Rabia Meryem Yilmaz und Juan Garzón.

Silvia Baldiris weist die höchste Netzwerkverflechtung auf. Ihre kontinuierlichen Publikationen in Kooperation mit verschiedenen Partner:innen über einen längeren Zeitraum lassen auf eine zentrale Rolle in der wissenschaftlichen Gemeinschaft schließen. Rabia Meryem Yilmaz und Juan Garzón sind insbesondere durch ihre hohe Publikationsaktivität im Zeitraum 2018 bis 2020 hervorzuheben.

Aus den Metadaten lassen sich weiterführende Untersuchungen ableiten, etwa eine Schlagwortanalyse zur Ermittlung potenzieller neuer Trends. Eine vertiefte Analyse dieser Aspekte wird in der Publikation [AFT25] behandelt.

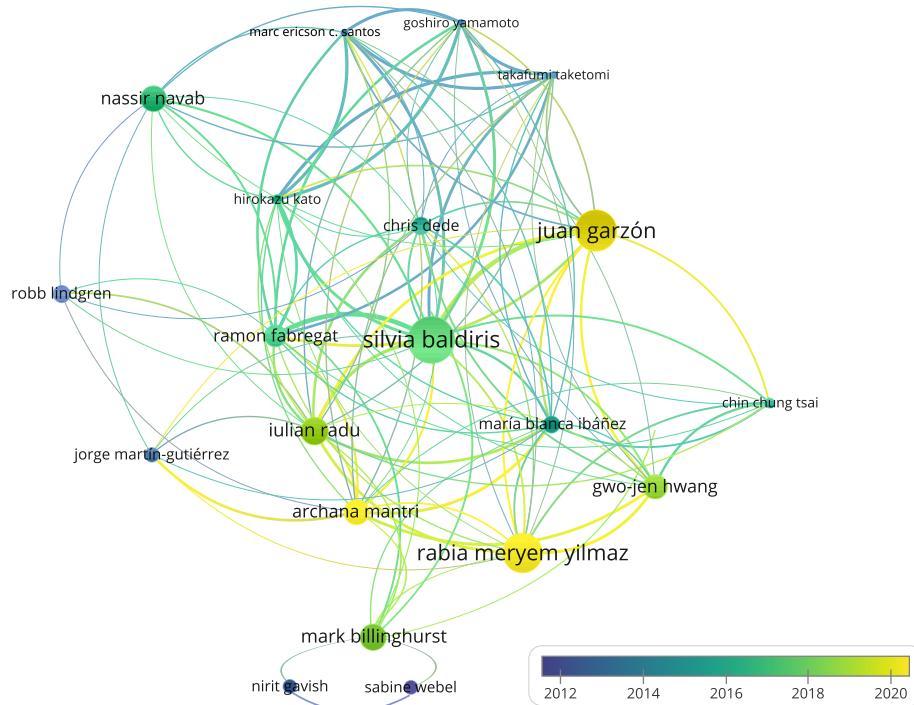


Abbildung 4.8: Netzwerk der am häufigsten zitierten Autor:innen, wobei die Knotengröße die Zitierhäufigkeit und die Farbskala das Jahr der Publikation repräsentiert.

Zusammengefasst bestätigen die Ergebnisse die globale Reichweite und das breite Interesse an der AR-Forschung, zeigen jedoch gleichzeitig eine Konzentration der Forschungstätigkeit auf bestimmte Länder, Institutionen und Autor:innen. Zudem verdeutlichen sie die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten von AR in verschiedenen Disziplinen und Kontexten [AFT25]).

4.4 Qualitative Analyse und Auswertung zu AR in technischen Laboren

4.4.1 AR-Anwendungen zur Nutzung während der Laborarbeit

Die Ergebnisse der qualitativen Analyse lassen sich in zwei Hauptkategorien unterteilen: den technologischen Aspekt und den Anwendungsbereich. Erstere umfasst die eingesetzte Technologie in mobiler oder stationärer AR sowie AR-Brillen (engl. HMD). Ergänzend dazu wird die Art der Augmentierung in markerlose (engl. *marker-less AR (ml AR)*), markerbasierte (engl. *marker-based AR (mb AR)*) und ortsbezogene (engl. *location-based AR (lb AR)*) Ansätze unterteilt.

Der Anwendungsbereich klassifiziert die Arbeiten nach verschiedenen Laboren, darunter *Chemie (CH)*, *Elektrotechnik (ET)*, *Biologie (BIO)*, *Physik (PHY)* und *sonstigen technischen Fächern (STF)*. Zudem berücksichtigt er den Anwendungszweck des jeweiligen Projekts, wie z. B. die Visualisierung mikroskopischer Prozesse oder kontextabhängiger Materialien.

Im nächsten Schritt erfolgt eine systematische Untersuchung der Studien in Bezug auf ihre Evaluationsmethodik. Analysiert wird dabei, ob und in welcher Form die AR-Anwendungen evaluiert werden, einschließlich des Forschungsdesigns mit Prä- und Posttests sowie des Einsatzes von Kontrollgruppen. Ergänzend dazu werden die eingesetzten Messinstrumente, wie Wissenstests, Fragebögen oder Interviews, und die dokumentierten Ergebnisse – sowohl positive als auch negative – berücksichtigt. Das Resultat dieser beiden Analyseschritte ist in den Tabellen 1 und 2 im Anhang (Kapitel I.6 ab S. VIII) übersichtlich dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Forschung technologisch vorwiegend auf markerbasierte mobile AR-Anwendungen setzt. Die Studien erheben häufig die Nutzendenerfahrung und Motivation mithilfe von Umfragen und Interviews. Eine fundierte Bewertung der Lerneffektivität von AR in Laborumgebungen gelingt jedoch selten.

Einerseits zeigen Studien keine negativen Effekte oder Einschränkungen in der Anwendbarkeit von AR-Anwendungen (z. B. [Fer+15]), während andere Untersuchungen gegenteilige Effekte in Bezug auf die Lernwirksamkeit nachweisen (z. B. [TKS14]). In der Studie von Tanner et al. (2014) bevorzugten über 90 % der untersuchten Proband:innen klassische Lernmethoden gegenüber der AR-Alternative. Ein wesentlicher Grund für die geringe Akzeptanz liegt in fehlenden oder unausgereiften didaktischen Gestaltungskonzepten sowie in der mangelhaften Benutzerfreundlichkeit der Anwendungen [AA17; SA16]. Diese

Defizite führen häufig zu einer mentalen Überforderung der Lernenden und gelten, neben technischen Schwierigkeiten, als Hauptursachen für das Misserfolgen von AR-Anwendungen (z. B. [Wu+13] und [Rad16]). Es bleibt zudem unklar, ob verbesserte Lernergebnisse nicht vielmehr auf die Neuartigkeit der Technologie zurückzuführen sind. Das damit einhergehende gesteigerte Interesse der Lernenden könnte dazu führen, sich intensiver mit den (Lehr-)Inhalten auseinanderzusetzen [DIK13]. Tatsächlich zeigen Studien, dass die Lernenden im Durchschnitt wesentlich mehr Zeit mit einer AR-Anwendung verbringen als mit herkömmlichen Alternativmedien [Gav+15].

4.4.2 AR-Anwendungen zur Vorbereitung auf die Laborarbeit

Trotz der zahlreichen Studien und Forschungsarbeiten existieren zum Zeitpunkt der Datenerhebung nur vereinzelte Vorhaben, die AR gezielt als Vorbereitungs- und Ergänzungsmaßnahmen für Laborarbeiten untersuchen.

Ein Beispiel ist die von Akçayir et al. (2016) entwickelte AR-App, die Schüler:innen bei der Vorbereitung auf das Laborpraktikum unterstützen soll. Sie beschränkt sich jedoch auf die Erweiterung gedruckter Literatur durch statische 3D-Modelle und Links zu weiteren Materialien wie Videos oder Texten [Akç+16].

Ähnlich verhält es sich bei den Projekten *ElectAR-notes* und *ELECT3D* von Martín-Gutiérrez et al. (2015). Während ersteres ebenfalls auf die Visualisierung von 3D-Modellen auf gedrucktem Papier ausgelegt ist, setzt *ELECT3D* den Einsatz komplexer Hardware und AR-Brillen voraus [Mar+15].

In dem Projekt *Augmented Reality Learning Environment (ARLE)* von Singh et al. (2019) ist eine stationäre AR-Anwendung entstanden, die einen Funktionsgenerator und ein Oszilloskop auf Desktop-Computern mithilfe einer Webcam und Markern visualisiert [Sin+19; Sin+21]. Die Wirksamkeit dieser Anwendung ist in einer Vergleichsgruppenstudie mit Prä-Posttest-Design untersucht worden. Die Studie berichtet von einem signifikant stärkeren positiven Effekt der Anwendung auf die Laborfähigkeiten im Vergleich zur **Kontrollgruppe (KG)**, was durch einen *Cohens d-Wert* von 1,343 als sehr starker Effekt bewertet wird [Sin+19, S. 11]. Ähnliche positive Ergebnisse werden auch für die mentale Überforderung und Motivation aufgezeigt.

Allerdings ist kritisch zu hinterfragen, dass alle Teilnehmer:innen vor dem Prätest eine Einführung in die Laborgeräte erhalten, was die Sinnhaftigkeit der anschließenden Aufteilung in *Experimentalgruppe (EG)* und KG infrage stellt. Darüber hinaus verfügt die KG lediglich über ein Handbuch zur Vorbereitung

auf den Test und entspricht damit nicht der realistischen Möglichkeit, wie sich Studierende auf den Umgang mit Laborgeräten vorbereiten können. Der Test ist an echten Laborgeräten durchgeführt und durch die Beobachtung eines Lehrenden bewertet worden. Diese Bewertungsmethode birgt die Gefahr subjektiver Einschätzung und ist besonders problematisch, wenn die Studie potenziell auch der Legitimation oder der Akquise von Forschungsmitteln dient, wie aus der Abschlussbemerkung der Autor:innen ersichtlich.

[...] the universities and academic institutions should provide support to teachers in developing unique AR experiences for students which will enhance the quality of education. [Sin+19, S. 14]

Zudem bleibt der Mehrwert einer funktional eingeschränkten AR-Simulation von Laborgeräten an einem stationären Computer unklar, insbesondere angesichts der Verfügbarkeit komplexer, voll funktionsfähiger und kostenlos zugänglicher Simulationen¹⁴. Denn die Interaktion ist in beiden Fällen identisch und erfolgt durch Klicken und Scrollen mit der Maus. Gleichzeitig entstehen jedoch höhere Hardwareanforderungen (z. B. Webcam) und eine Abhängigkeit von äußeren Faktoren wie guten Lichtverhältnissen.

In einer Folgestudie haben G. Singh und F. Ahmad (2024) den Aufbau der ARLE durch ein *Arduino-Board*¹⁵ erweitert, um Daten von realen Geräten in die Anwendung zu integrieren [SA24]. Die Studie umfasst 80 Teilnehmende; gleichmäßig aufgeteilt in KG und EG. Ziel der Untersuchung ist es unter anderem, den Einfluss der Anwendung auf die motorischen Fähigkeiten der Studierenden im Umgang mit elektrotechnischen Laborgeräten zu analysieren. Beide Gruppen erhalten zunächst eine Einführung und können mit den jeweils vorgesehenen Materialien trainieren, was aus der ARLE-Anwendung für die EG und Handbücher für die KG besteht. Beide Ansätze werden durch praktische Übungen an realen Geräten ergänzt. Die Studie berichtet auch hier von einem signifikanten Leistungsunterschied zwischen den beiden Gruppen. In dem Posttest wird ein durchschnittlicher Punkteunterschied von 3,27 zwischen EG (31,72 von 40) und KG (28,45 von 40) errechnet.

Obwohl die Anwendung laut der Autor:innen ursprünglich dazu entwickelt wurde, Studierende auf den Umgang mit Laborgeräten vorzubereiten, beschränkt sich die Übertragung von Messwerten realer Geräte in die ARLE-Anwendung

¹⁴ z. B. <https://www.virtuelles-oszilloskop.de>

¹⁵ Open-Source-Mikrocontroller-Plattform mit digitalen und analogen Ein- und Ausgängen

deren praktischen Mehrwert. Die eigentliche Intention, eine orts- und zeitunabhängige Vorbereitungsmöglichkeit zu bieten, wird dadurch nicht erreicht.

Damit zeigt sich eine große Forschungslücke, da keine der in der qualitativen Analyse untersuchten Arbeiten den Anforderungen einer kostenfreien¹⁶, zeitlich flexiblen und realitätsnahen Vorbereitung auf den Umgang mit elektrotechnischen Laborgeräten erfüllt. Die Arbeiten verdeutlichen dennoch das große Potenzial von AR zur Unterstützung praktischer Lernprozesse.

4.4.3 Potenziale von AR mit Fokus auf die Nutzung in Laboren

Aus der qualitativen Untersuchung lassen sich die folgenden Potenziale für den Einsatz im Laborpraktikum identifizieren:

- **Intuitive Bedienung:** Im Gegensatz zu klassischen Medien wie dem Computer, bei dem die Interaktion häufig über Maus und Tastatur erfolgt, erlauben AR-Anwendungen, psychomotorische Fertigkeiten auf natürliche Weise zu üben und zu erlernen [Wu+13]. Studien zeigen, dass diese Interaktionsform den Lernerfolg im Vergleich zu herkömmlichen Eingabemethoden steigert [Sku+16]. Neben der zeit- und ortsunabhängigen Nutzung, die den meisten digitalen Medien gemein ist, ermöglicht AR darüber hinaus ein intuitiveres Training im Umgang mit (virtuellem) Laborequipment.
- **Visualisierung „unsichtbarer“ Phänomene:** Eine weitere Besonderheit von AR ist die anschauliche Darstellung unsichtbarer Phänomene wie elektrischer oder magnetischer Felder, beispielsweise aus der Perspektive eines Elektrons. Diese Form der Visualisierung erleichtert den Wissenstransfer und fördert ein tieferes Verständnis der Lerninhalte. Studien belegen, dass solche emotional geprägten Lernmethoden effektiver sind als konventionelle Ansätze wie Lernvideos [Göt+11].
- **Wechselwirkung zwischen der realen Welt und virtuellen Informationen:** Durch die Überlagerung virtueller Informationen auf reale Objekte wird ein stärkerer Bezug zur physischen Umgebung geschaffen [Arv+09]. Beispielsweise lassen sich während eines realen Praktikums

¹⁶ d. h. ohne zusätzliche Geräte

Bedienhilfen oder Anleitungen an einem Oszilloskop visualisieren, um Studierende bei der Bedienung zu unterstützen. Die Besonderheit liegt dabei in einer dynamischen Anpassung der Inhalte, etwa indem Fehleinstellungen durch visuelle Hinweise korrigiert werden. Durch die Integration der realen Umgebung in den Lernprozess werden die didaktische Gestaltung und Struktur der Lernaktivitäten direkt beeinflusst [Her12].

- **Kollaboration:** Im Gegensatz zu VR, das eine geschlossene Lernumgebung bietet, bleibt die Umgebung in AR offen, was kollaborative Lernformate erleichtert. Dadurch können Gruppenarbeiten unterstützt werden, bei denen Lernende Ergebnisse gemeinsam betrachten und diskutieren, auch wenn individuelle Visualisierungen eingeblendet sind. Zudem ist eine ortsunabhängige Zusammenarbeit möglich, indem Teilnehmende als virtuelle Avatare im realen Raum erscheinen. So werden Gruppenprozesse interaktiver gestaltet und der Wissensaustausch gefördert [RT06].
- **Geringerer Betreuungsaufwand:** Durch eine Vorbereitung mithilfe von AR benötigen Studierende weniger direkte Betreuung und Beratung während des Praktikums. Dies entlastet das wissenschaftliche Personal, das sich stärker auf die Beobachtung und Bewertung der Lernfortschritte der Studierenden konzentrieren kann (z. B. [Sin+19] und [SA24]).
- **Erhöhte Motivation:** Die innovativen Visualisierungsformen von AR fördern bei Studierenden und Schüler:innen eine deutlich höhere Lernbegeisterung und führen in der Folge zu einer gesteigerten Motivation, die Lern-App weiterhin zu nutzen. Über 95 % der Studien zu AR, unabhängig vom Kontext, heben diesen Effekt hervor, insbesondere im Rahmen systematischer Literaturanalysen (z. B. [ÁV21] und [Avi+21]).
- **Erhöhte Lernwirksamkeit:** Viele Studien belegen außerdem eine gesteigerte Lernwirksamkeit durch den Einsatz von AR-Lern-Apps (z. B. [Sin+19] und [SA24]). Obwohl die genauen Methoden und Messinstrumente dieser Untersuchungen häufig unklar sind, wird der hohe Immersionsgrad als wesentlicher Faktor für die positive Wirkung von AR betrachtet. Immersion beschreibt das Gefühl, in eine Umgebung einzutauchen, bei der reale und virtuelle Elemente nahtlos miteinander verschmelzen [KMB22]. Dieser Effekt fördert ein tiefes Verständnis durch eine intensive und aktive Auseinandersetzung mit dem Lernstoff. Emotionale und motivationale

Elemente, wie Gamification, können diese Wirkung zusätzlich verstärken (s. o.).

Aufgrund dieser Vorzüge eignet sich AR besonders gut für den Einsatz im Vorpraktikum, damit Studierende den Umgang mit Laborgeräten erlernen.

Das folgende Kapitel stellt das erste Research Pentagon dar und beschreibt ein fundiertes didaktisches Konzept für die Entwicklung der AR-App. Dabei wird untersucht, wie Studierende grundlegende Kompetenzen im Umgang mit Laborgeräten erlernen können, unabhängig von der eingesetzten Technologie, sodass auch neue Formate wie AR nicht zum Selbstzweck werden, sondern in ein tragfähiges Lehrkonzept eingebettet sind.

Abschnitt II - Mikrozyklen

5

Didaktisches Konzept

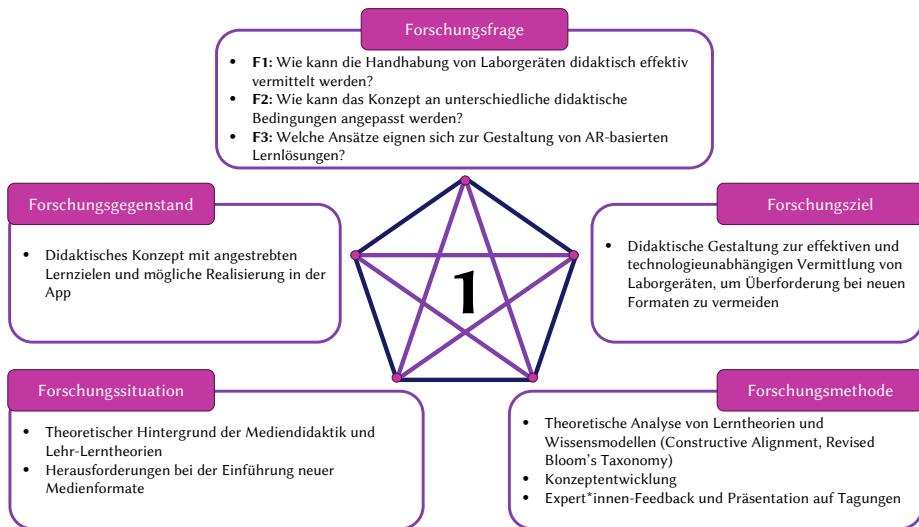


Abbildung 5.1: Research Pentagon zum didaktischen Konzept

5.1 Problemstellung, Forschungsfragen und -ziel

Empirische Erkenntnisse legen nahe, dass der Lernerfolg neuer Medien mitunter sehr stark von einer soliden didaktischen Fundierung abhängt (vgl. [KSd03] und [KOS11]).

„Letztlich – so die Annahme – wird der Erfolg des Mediums (und das heißt in der ‚gestaltungsorientierten Mediendidaktik‘: Die faktische Nutzung sowie die Nutzeffekte für Individuum und Organisation) weniger durch das Medium selbst determiniert als durch die Passung des Mediums zu den Bedingungen des didaktischen Feldes.“ [Ker99, S. 1]

Innovationen, die lediglich aufgrund ihrer Neuheit oder ihres vermeintlichen Potenzials eingeführt werden, können bei den Lernenden zu Frustration führen, was nicht selten in einer ökonomischen Ineffizienz resultiert, da ungenutzte Geräte oder Materialien in Vergessenheit (und Abstellkammern) geraten (vgl. [KSd03] und [KOS11]). Dies trifft insbesondere auf neue Gestaltungsformate wie AR zu, da hierbei neben den Lerninhalten auch die ungewohnte Darstellungs- und Interaktionsart schnell zu Überforderung bei Lernenden führen kann (vgl. [TKS14] oder [Fer+15]).

Das didaktische Konzept bildet die Grundlage für die Machbarkeitsstudie in Kapitel 6. Im Zentrum steht dabei die Frage, wie Studierende den Umgang mit und die Handhabung von Laborgeräten wirksam erlernen können – unabhängig vom Medium oder der eingesetzten Technologie (Forschungsfrage F1). Zusätzlich wird betrachtet, inwiefern das Konzept flexibel an unterschiedliche didaktische Rahmenbedingungen angepasst werden kann (F2) und welche Ansätze sich speziell für die Gestaltung einer AR-basierten Lösung eignen (F3).

Aus diesen Fragestellungen ergibt sich das zentrale Ziel dieses Pentagons, ein fundiertes didaktisches Konzept zu entwickeln, das sowohl für die praktische Umsetzung im E-Labor der Elektrotechnik als auch für eine gleichwertige AR-basierte Lösung dient.

5.2 Forschungsmethode

Um dieses Ziel zu erreichen, werden zunächst verschiedene Wissensmodelle und Lerntheorien theoretisch untersucht. Dabei steht im Fokus, welche zentralen Aspekte der jeweiligen Lerntheorien in der praktischen Anwendung berücksichtigt werden können. Das *Constructive Alignment* in Verbindung mit der *Revised Bloom's Taxonomy* dient als Grundlage für die didaktische Konzeption des Forschungsgegenstands. Dies umfasst die Definition konkreter Lernziele, die Gestaltung passender Lernaktivitäten sowie die Entwicklung geeigneter Bewertungsmethoden. Angesichts der noch ausstehenden App-Entwicklung in dieser Phase erfolgt die Evaluierung des didaktischen Ansatzes primär auf einer theoretischen Ebene durch Expert:innen-Feedback aus der Physik- und Chemiedidaktik sowie Wirtschaftspädagogik. Darüber hinaus wird das Konzept auf wissenschaftlichen Tagungen wie der *DigiSelF¹⁷ Klausurtagung* oder dem *Tag der Lehre* an der Universität Paderborn vorgestellt. Die gewonnenen kritischen Rückmeldungen fließen in die schrittweise Optimierung und Verfeinerung des Konzepts ein.

¹⁷ Digitalisierung als Herausforderung und Innovation in der Hochschullehre

5.3 Forschungssituation: Lehr-Lern-Modelle und -Theorien

5.3.1 Lerntheorien

Aus den Erkenntnissen der Psychologie lassen sich im Folgenden die wichtigsten Lerntheorien ableiten, die die Lernprozesse sinnvoll erklären.

Behaviorismus

Der Behaviorismus betrachtet Lernen als eine Abfolge von Stimulus-Antwort-Sequenzen und vernachlässigt interne kognitive Prozesse, da diese als nicht direkt beobachtbar gelten und somit als „*Black Box*“ beschrieben werden [Für19; Wat13]. Stattdessen liegt der Fokus auf äußerem Verhalten, das durch Belohnung oder Bestrafung verstärkt oder abgeschwächt wird, um ein bestimmtes Lernziel zu erreichen. Auf dieser Grundlage lassen sich didaktische Medien entwickeln, die durch unmittelbares Feedback auf Lernaktivitäten einen positiven Einfluss auf den Lernprozess haben [KW06]. In digitalen Lernumgebungen sollte auf negative Verstärkung – also das Ausbleiben einer Bestrafung – verzichtet werden, da die Auftrittswahrscheinlichkeit für das gezeigte Verhalten bestehen bleibt. Positive Bestrafung hingegen führt dazu, dass die Wahrscheinlichkeit eines unerwünschten Verhaltens sinkt, weil eine unangenehme Konsequenz folgt, z. B. Verlust von Punkten. Ein wesentlicher Vorteil digitaler Lernformate liegt darin, dass diese Maßnahmen ohne langfristige Konsequenzen erfolgen, wodurch Lernende angstfrei experimentieren und gezielt Feedback einholen können [Sch09]. Jedes digitale Lehrmedium konditioniert die Lernenden im Sinne des Behaviorismus, da die weitere Nutzung des Mediums mit den zuvor gemachten Erfahrungen geprägt wird.

Kognitivismus

Der Kognitivismus ist eine an den Erkenntnissen der Datenverarbeitung bei Computern angelehnte Lerntheorie. In ihren Anfängen beruht sie auf einer Analogie zwischen dem menschlichen Denken und dem Aufbau sowie der Funktionsweise eines Computers [Pet20; Rei15]. Demnach kann das Gehirn – als kognitive Maschine – Informationen aufnehmen, verarbeiten, speichern und abrufen, ähnlich wie die Datenverarbeitung eines Computers. Informationen

gelangen in Form von Reizen oder Inputs in das kognitive System und durchlaufen verschiedene Prozesse. Dazu zählen die Aufmerksamkeit, bei der relevante Informationen selektiert werden, die Verarbeitung, bei der neue Inhalte mit vorhandenem Wissen verknüpft werden, sowie das Gedächtnis, das für die Speicherung verantwortlich ist. Das Ergebnis dieser Prozesse äußert sich schließlich in Form von Verhaltensweisen, Antworten oder Lernergebnissen [Für19; NW14; RW18]. Aus dem Kognitivismus haben sich zahlreiche weiterführende Theorien und Strategien entwickelt, die das Lernen beeinflussen und begünstigen, unter anderem die Überforderungstheorie (engl. *Cognitive Load Theory*), die sich mit der kognitiven Belastung beim Lernen auseinandersetzt [Pet20; PRS03].

Auf dieser Grundlage lassen sich erste Empfehlungen für die Gestaltung von Lernmaterial ableiten:

- **Verknüpfung mit Vorwissen:** Nach Seidel und Krapp (2014) ist der Lernerfolg maßgeblich davon abhängig, ob neue Inhalte an bestehendes Wissen angeknüpft werden können. Informationen werden schneller verarbeitet und langfristig gespeichert, wenn sie in eine bereits vorhandene kognitive Struktur eingebettet sind [SK14].
- **Reduzierung der kognitiven Belastung:** Die anfängliche *intrinsische kognitive Belastung*, die durch die hohe Komplexität neuer Lerninhalte entsteht, kann durch eine Aufteilung in kleinere Lerneinheiten reduziert werden. Ein sukzessives Heranführen an komplexere Inhalte trägt zusätzlich zur Entlastung bei [PRS03].
- **Optimierung der Darstellung von Lerninhalten:** *Ineffektive kognitive Belastung* entsteht, wenn Lerninhalte gegen grundlegende Prinzipien der Wahrnehmungsorganisation [GZ18] oder gegen gestalterische Gesetzmäßigkeiten verstößen [Kor22]. Im Gegensatz dazu fördert eine *effektive kognitive Belastung* den Lernprozess, da sie die aktive Auseinandersetzung mit den Inhalten anregt und den Aufbau neuer Wissensstrukturen unterstützt [Pet20].

Konstruktivismus

Der Konstruktivismus betrachtet Lernen als einen individuellen und aktiven Schöpfungsprozess [VC81]. Die zentrale Idee ist, dass Lernen nicht einfach durch passives Aufnehmen von Informationen erfolgt, sondern eine aktive Wissenskonstruktion darstellt, die auf individuellen Einstellungen, Erfahrungen und Vorwissen basiert. Ein Grundsatz konstruktivistischer Ansätze besagt, dass

Realität nicht objektiv existiert, sondern immer in Abhängigkeit von der Wahrnehmung der lernenden Person konstruiert wird [BP99]. Lernprozesse entstehen durch die Interaktion mit der Umwelt und die Entwicklung mentaler Modelle, mit denen Lernende ihre Sicht auf die Welt strukturieren [Rei15]. Die Verarbeitung neuer Informationen erfolgt dabei auf zwei Wegen: *Assimilation*, also die Einordnung in bestehende Wissensstrukturen, oder *Akkommodation*, d. h. die Anpassung und Neustrukturierung kognitiver Modelle [Pet20]. Lernen führt somit zur kontinuierlichen Erweiterung und Reorganisation des vorhandenen Wissens.

Im Gegensatz zu angeleiteten Lehrmethoden lässt sich der Wissenserwerb beim aktiven Erkunden, Experimentieren, Problemlösen und Reflektieren nur begrenzt steuern oder unterstützen [Pet20]. Aus konstruktivistischer Perspektive sollten Lehrmaterialien daher so gestaltet sein, dass sie experimentelle Freiräume ermöglichen und selbstgesteuertes sowie entdeckendes Lernen fördern. Dieser Lernansatz erfordert jedoch mehr Zeit, da keine festen Strukturen und Zusammenhänge vorgegeben werden [Für19].

Der **Sozialkonstruktivismus** erweitert diesen Ansatz, indem er die Bedeutung sozialer Interaktion und Kommunikation als zentrale Elemente des Lernens betont [BCD89; Gre89]. Wissen entsteht demnach nicht isoliert, sondern in gemeinschaftlichen Prozessen durch Austausch, Diskussionen und den kulturellen Kontext (vgl. [Gei17] und [Kön09]). Lehrmaterialien sollten daher gezielt kollaboratives Arbeiten und gemeinsames Experimentieren unterstützen, indem sie interaktive Fragestellungen und kooperative Lernformen einbinden.

5.3.2 Constructive Alignment

Aus den vielen didaktischen Konzepten und Herangehensweisen zur Gestaltung von Lehr-Lern-Settings bietet sich das Constructive Alignment nach Biggs (2012) aufgrund seiner systematischen Herangehensweise an (vgl. [Gle+15] und [Big12]). Es umfasst drei zentrale Schritte, um eine kohärente Gestaltung von Lehr-Lern-Prozessen zu gewährleisten: 1. die Festlegung klarer Lernziele, 2. die Gestaltung passender Lehr- und Lernaktivitäten sowie 3. die Auswahl geeigneter Bewertungsmethoden [Gle+15] (vgl. Abb. 5.2).

Das Grundprinzip besteht darin, dass Lernende effektiver Wissen erwerben, wenn alle Lehr- und Lernaktivitäten sowie die Prüfungsform direkt auf die definierten Lernziele ausgerichtet sind. Damit stellt es sicher, dass das erworbene Wissen nicht nur oberflächlich reproduziert, sondern aktiv angewendet und

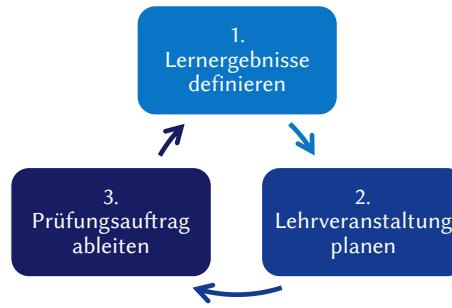


Abbildung 5.2: Die drei Phasen des Constructive Alignment. Eigene Darstellung.

vertieft wird [Big12]. Durch den besonderen Fokus auf die Lernziele bietet das Constructive Alignment einen fundierten theoretischen Rahmen für die didaktische Planung und Entwicklung der AR-App.

5.3.3 Revised Bloom's Taxonomy

Im Kontext verschiedener Lerntheorien lässt sich auch eine Differenzierung der Wissenskategorien vornehmen. Benjamin S. Bloom veröffentlichte 1956 die erste Lernziel-Taxonomie, die sechs hierarchische Stufen des kognitiven Lernens beschreibt [Blo56]. Diese Stufen bauen aufeinander auf und nehmen hinsichtlich ihrer Komplexität und Abstraktion zu (vgl. [Blo20]). Ein wesentlicher Kritikpunkt dieser ursprünglichen Taxonomie liegt in der eindimensionalen Struktur, die nur die kognitive Prozessdimension berücksichtigt und ihre Anwendung in der Praxis erschwert [Gei17]. Um diese Einschränkung zu umgehen, haben Anderson und Krathwohl (2001) eine überarbeitete Taxonomie (*Revised Bloom's Taxonomy*) entwickelt, welche die ursprüngliche eindimensionale kognitive Prozessdimension um eine zusätzliche Wissensdimension erweitert und somit ein zweidimensionales Modell darstellt (vgl. [Kra02] und [Wil16]).

Diese sind im Folgenden aufgelistet:

- **Faktenwissen (Factual Knowledge):** Informationen, Fakten und Begriffe wissen und erinnern.
- **Konzeptwissen (Conceptual Knowledge):** Zusammenhänge zwischen Ideen, Konzepten und Theorien verstehen.

- **Prozesswissen (Procedural Knowledge):** Schritte, Methoden und Verfahren anwenden können.
- **Metakognitives Wissen (Metacognitive Knowledge):** Das Wissen über eigene Lernstrategien, Reflexion und Regulation des eigenen Lernprozesses.

Die Konkretisierung der Wissensdimension nimmt von der untersten Ebene, dem *Faktenwissen* bis zur obersten Ebene, dem *Metakognitiven Wissen* ab. Dadurch wird das Wissen nicht nur zunehmend abstrakter, sondern auch schwieriger zu vermitteln, da es aktiv von den Lernenden selbst konstruiert werden muss.

Neben der Wissensdimension haben Anderson und Krathwohl zusätzlich die kognitive Prozessdimension aktualisiert: Einzelne Kategorien tragen neue Bezeichnungen, die Reihenfolge der letzten beiden Stufen ist vertauscht und Substantive durch Verben ersetzt worden, um den Fokus stärker auf aktive Lernprozesse zu legen [Wil16].

- **Erinnern:** Relevantes Wissen aus dem Langzeitgedächtnis abrufen
- **Verstehen:** Die Bedeutung von Unterrichtsbotschaften erfassen
- **Anwenden:** Verfahren aus bestimmten Situationen ausführen oder verwenden
- **Analysieren:** Materialien in grundlegende Teile zerlegen und Interaktion sowie Beziehung zur Gesamtstruktur analysieren
- **Bewerten:** Urteile auf Grundlage von Kriterien und Normen fällen (bewerten, beurteilen, einschätzen)
- **Erschaffen:** Elemente zu einer kohärenten Einheit integrieren und dabei ein neues Muster oder eine neue Struktur schaffen

Mit der Unterscheidung zwischen den beiden Dimensionen bietet die überarbeitete Taxonomie eine differenziertere und umfassendere Perspektive auf die kognitiven Fähigkeiten und Leistungen von Lernenden. Sie wird daher als Leitfaden für die Entwicklung und Zuordnung der Lernziele entlang der Dimensionen verwendet.

5.4 Forschungsgegenstand: Didaktisches Konzept

5.4.1 Lernziele

Auf Basis der allgemeinen Lernziele aus Kapitel 3.1 sowie der in den Workshops erarbeiteten Zielsetzungen für das Grundlagenpraktikum (Anhang S. IV) werden die Lernziele für das Vorpraktikum nun weiter konkretisiert. Anschließend erfolgt eine systematische Zuordnung zur überarbeiteten Taxonomie nach Bloom von Anderson und Krathwohl (vgl. Abb. 5.3).

Die numerische Kennzeichnung der Lernziele spiegelt unterschiedliche Hierarchiestufen wider, während die Buchstaben die jeweiligen Schwerpunkte differenzieren: a bezieht sich auf die Laborgeräte, b auf elektrotechnische Komponenten und Elemente. Um die Praktikabilität zu erhöhen, werden die Kategorien „Analysieren“ und „Auswerten“ zusammengeführt. Die folgende Abb. zeigt das Gesamtergebnis dieses Prozesses (Abb. 5.3).

		Kognitions-Verarbeitungs-Dimension				
		Erinnern	Verstehen	Anwenden	Analysieren & Beurteilen	Erschaffen
Wissens-Dimension	Faktenwissen	Lernziel 1a: Laborgeräte				
	Konzeptwissen	Lernziel 1b: Elektrotechnische Bauelemente	Lernziel 2b: Elektrotechnische Bauelemente	Lernziel 3b: Experimente		
	Prozedurales Wissen		Lernziel 2a: Laborgeräte	Lernziel 3a: Messgeräte Bedienung		
	Meta-Kognitives Wissen				Lernziel 4: Daten Analyse und Fehler Identifikation	Lernziel 5: Schaltplanzeichnung; Kreativität, Aus Fehlern lernen

Abbildung 5.3: Angepasste Tabelle der überarbeiteten Taxonomie nach Bloom von Krathwohl et al. mit Lernzielen für das Vorpraktikum, wobei a für Laborgeräte und b für elektrotechnische Komponenten steht

Die einzelnen Lernziele sind nachfolgend in einer übersichtlichen Gliederung dargestellt:

- **Lernziele 1a und 1b:** Die Studierenden sollen verschiedene Laborgeräte (1a) sowie elektrotechnische Bauelemente (1b) anhand der bereitgestellten Vorbereitungsmaterialien (wieder-)erkennen. Der Fokus liegt darauf, ein grundlegendes Verständnis für unterschiedliche Modelle, Bauformen und Bezeichnungen zu entwickeln. Gespräche mit Studierendenvertretenden zeigen, dass viele zwar Schaltbilder der Bauelemente identifizieren können, jedoch keine Vorstellung von deren physischer Erscheinung haben

— etwa den verschiedenen Bauformen eines Widerstands. Hierfür eignet sich die dreidimensionale Visualisierung bei AR, da Studierende die Bauelemente und Laborgeräte aus verschiedenen Perspektiven betrachten und Erklärungen einblenden lassen können. Im Fall des Oszilloskops umfasst dies zunächst ein grundlegendes Verständnis darüber, was ein Oszilloskop ist, in welchen Situationen es verwendet wird und welche zentralen Funktionen im Praktikum A benötigt werden. Dazu gehören die vertikale Skalierung zur Einstellung der Empfindlichkeit, die horizontale Skalierung zur Festlegung der Zeitbasis sowie die Möglichkeit, das Signal entlang der Achse zu verschieben, um beispielsweise einen Offset auszugleichen. Auch die Zuordnung der Eingangskanäle und das Wiedererkennen relevanter Messfunktionen zählen zu den Lernzielen.

- **Lernziele 2a und 2b:** Lernziel 2b behandelt die Unterschiede zwischen idealen und realen elektrotechnischen Komponenten. In der Theorie werden Bauteile, die keine Verluste oder Abweichungen aufweisen, oft als ideal betrachtet. In der Praxis jedoch besitzen reale Bauelemente Toleranzen, parasitäre Effekte oder temperaturabhängige Eigenschaften, die das Schaltungsverhalten beeinflussen. Diese Diskrepanzen lassen sich durch gezielte Messungen und die Analyse von Messwerten sichtbar machen. Studierende sollen erkennen, wie beispielsweise Widerstände von ihrem Nennwert abweichen, Spulen und Kondensatoren Frequenzabhängigkeiten aufweisen oder reale Dioden eine Durchlassspannung benötigen. Lernziel 2a hingegen zielt auf den praktischen Umgang mit Laborgeräten ab. Vielen Studierenden ist nicht bewusst, dass bestimmte Bedienelemente mehrere Funktionen haben, etwa Drehregler, die gleichzeitig als Bestätigungsstäbe dienen. Solche Details sind jedoch essenziell für eine korrekte Bedienung, beispielsweise bei der Nutzung der Messfunktion eines Oszilloskops. Dieses Wissen kann durch interaktive Bedienungshilfen, visuelle Hinweise oder eine Einführung durch einen virtuellen Tutor vermittelt und gefestigt werden.
- **Lernziele 3a und 3b:** Diese Stufe baut auf den zuvor erworbenen Kenntnissen aus 1a/b und 2a/b auf und überführt sie in die praktische Anwendung. Die Studierenden sollen die virtuellen Laborgeräte und Komponenten gezielt einsetzen sowie deren Funktionen sicher und korrekt nutzen. Der Fokus liegt darauf, erlernte Konzepte in realistischen Szenarien anzuwenden, beispielsweise durch das eigenständige Einstellen von Messgeräten oder das Aufbauen von Schaltungen.

- **Lernziel 4:** Hier geht das Verständnis über die reine Bedienung hinaus und umfasst die Analyse und Interpretation von Messergebnissen. So kann beispielsweise durch gezielte Messinstruktionen der Unterschied zwischen spannungs- und stromrichtiger Messung evaluiert werden. Zudem erlaubt die Manipulation virtueller Laborgeräte eine gezielte Untersuchung der Unterschiede zwischen idealen und realen Bauelementen. Dies wird durch die Möglichkeit veranschaulicht, wahlweise reale oder idealisierte Messwerte auszugeben und deren Einfluss auf das Messergebnis zu analysieren. Weitere Aspekte wie Messfehler, Messunsicherheiten oder Ungenauigkeiten lassen sich auf dieser Stufe analysieren und bewerten, wodurch Studierende ein vertieftes Verständnis für experimentelle Messverfahren erlangen.
- **Lernziel 5:** Dieses optionale Lernziel bietet einen offenen Experimentierraum für interessierte und kreative Studierende. Sie haben die Möglichkeit, eigenständig mit virtuellen Laborgeräten und Komponenten zu arbeiten, eigene Schaltungen zu entwerfen und Messungen durchzuführen. Der Schwerpunkt liegt sowohl auf dem reflektierten Umgang mit Fehlern als auch auf der Entwicklung gezielter Strategien zur Planung, Durchführung und Auswertung experimenteller Versuche.

Eine detaillierte Ausformulierung der einzelnen Lernziele auf jeder Ebene findet sich im Anhang ab S. [XXII](#). Durch die Definition und Kategorisierung dieser messbaren Lernziele lässt sich im nächsten Schritt gezielt ableiten, welche Lernaktivitäten für die App entwickelt werden sollen. Zudem ermöglicht die klare Zielsetzung eine fundierte Bewertung der Wirksamkeit der geplanten Maßnahmen.

5.4.2 Lernaktivitäten

Die hierarchisch aufgebaute kognitive Prozessdimension nach Bloom dient als Grundlage für die Gestaltung der App mit verschiedenen Leveln, die gleichzeitig das Lernniveau repräsentieren (vgl. [\[Blo20\]](#), [\[FA05\]](#)). Abb. [5.4](#) veranschaulicht diesen gestuften Lernprozess.

Nach dem Onboarding wird zwar Level 1 als nächster Schritt vorgeschlagen, doch besteht durchgehend die Möglichkeit, ein Level zu beenden, neu zu beginnen oder ein beliebiges anderes auszuwählen.

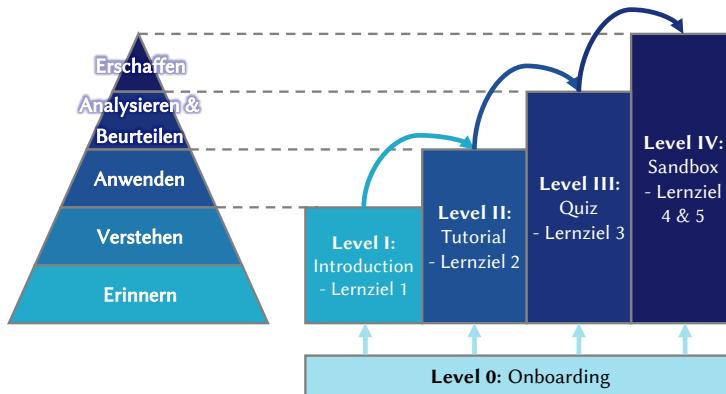


Abbildung 5.4: Transformation der Taxonomie nach Bloom mit hierarchisch ansteigenden Anforderungen an die Kognition als spätere Level in der App.

Wie in Kapitel 3.4 erläutert, steht im Vorpraktikum die Vermittlung praktischer Kompetenzen im Umgang mit Laborgeräten im Vordergrund. Die Lernziele sind zwar übergreifend formuliert, doch die im Folgenden beschriebenen Level konzentrieren sich vorrangig auf das Oszilloskop als zentrales Laborgerät.

Level 0 – Einführung in die App (Onboarding):

Dem Konzept wird ein zusätzlicher, vorgelagerter Startlevel (Level 0) hinzugefügt, um die Nutzer:innen schrittweise an die App heranzuführen. Es ist als intuitiv gestaltetes Onboarding umgesetzt und zielt auf zwei wesentliche Aspekte hin: erstens die Einführung in die Funktionen der App und zweitens die Vermittlung grundlegender AR-Konzepte sowie Interaktionsmöglichkeiten, etwa die Instruktion das Smartphone oder Tablet zu bewegen, um ebene Flächen im Raum zu detektieren (vgl. Abb. 5.5). Dadurch lassen sich die kognitive Überlastung und die Frustration der Nutzer:innen im Umgang mit der Anwendung minimieren (z. B. [AT17] und [TW13]). Ein solches Vorgehen entspricht kognitivistischen Annahmen, nach denen eine gezielte Reduktion der Belastung wesentlich zur Förderung des Lernerfolgs beiträgt (siehe Kapitel 5.3.1).

Das Onboarding wird typischerweise einmalig nach der Installation und dem ersten Start der App präsentiert, um den Einstieg zu erleichtern und eine wiederholte Darbietung bereits erlernter Instruktionen im späteren Nutzungsprozess zu vermeiden.

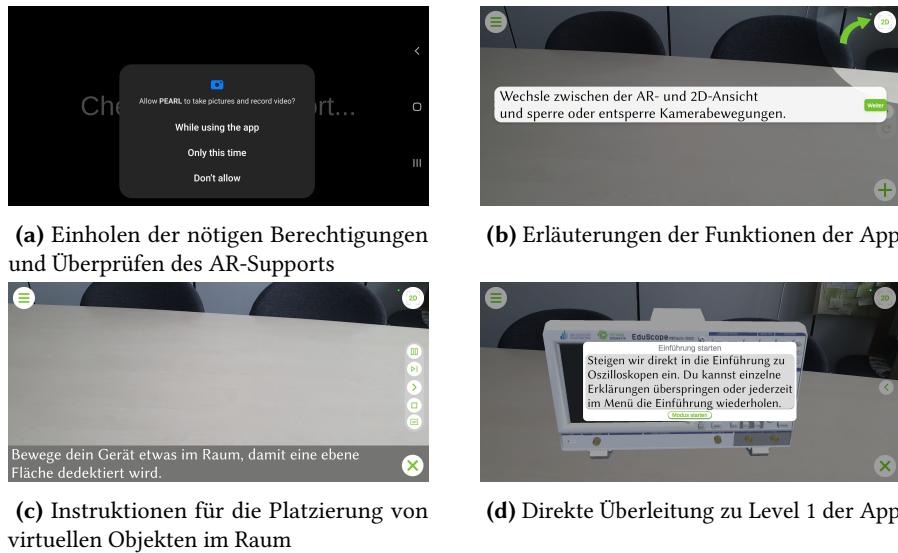


Abbildung 5.5: Level 0 mit Onboarding, wobei zunächst technische Voraussetzungen geprüft werden (5.5 (a)), gefolgt von Erläuterungen zur Benutzendenschnittstelle (engl. *User Interface – UI*) der App (5.5 (b)), Instruktionen zur Nutzung der AR-Features (5.5 (c)) und Überleitung zum nächsten Level (5.5 (d)). Das Onboarding wird einmalig nach der Installation und dem initialen Start der App ausgeführt und lässt sich später nur im Menü wiederholen.

Level 1 – Erklärungen (Introduction):

Zunächst mag der Umgang mit einem Oszilloskop aufgrund der vielen und unbekannten Bedienelementen als komplex wahrgenommen werden. Statt das Oszilloskop allein durch Ausprobieren zu erlernen, ist es sinnvoll, Lernende zunächst mit deklarativem Faktenwissen vertraut zu machen. Dazu zählen eine allgemeine Einführung zur Nutzung sowie eine Erklärung der Bedienelemente und Funktionen von Oszilloskopen, um ein fundiertes Verständnis der Steuerungsmechanismen zu schaffen (explizites Wissen). Hier zeigt sich der Bezug zum Kognitivismus, der den Aufbau deklarativen Wissens und die Einbettung in bestehende Wissensstrukturen betont (vgl. Kapitel 5.3.1).

In diesem Level erhalten die Studierenden einen Überblick über den grundlegenden Aufbau des Oszilloskops sowie dessen zentrale Funktionen, darunter Empfindlichkeit, Zeitbasis und das Display mit der zugehörigen Legende. Der



(a) Animierte Erklärung zum Verwendungszweck von Oszilloskopen



(b) Highlight der Funktionsbereiche und Buttons am Oszilloskop, zu denen Erklärungen vorliegen

Abbildung 5.6: Level 1 mit animierten Erklärungen der wesentlichen Funktionsbereiche eines Oszilloskops (5.6 (a)). Die Informationen liegen in textueller und/oder auditiver Form vor und lassen sich für jeden Bereich abrufen (5.6 (b)).

Handlungsspielraum bleibt dabei bewusst eingeschränkt. Statt eigenständiger Interaktion können die Studierenden lediglich gezielt Funktionsbereiche des Geräts auswählen und sich die relevanten Informationen über Animationen sowie textuelle und auditive Erklärungen anzeigen lassen (vgl. Abb. 5.6). Da die Vorkenntnisse variieren, ist dieser Einführungsschritt zwar essenziell (vgl. Abb. 5.4), kann jedoch bei vorhandenem Wissen übersprungen werden.

Level 2 – Schritt-für-Schritt-Anleitungen (Tutorial):

In Level 2 erlernen die Studierenden den Umgang mit dem Oszilloskop durch eine interaktive und schrittweise Anleitung, das sogenannte *Tutorial*. Jedes Tutorial ist dabei auf ein bestimmtes Konzept ausgerichtet, das schrittweise erarbeitet wird. Dies sind zunächst die Nutzung der grundlegenden Funktion eines Oszilloskops im Anfänger:innen-Tutorial (vgl. Abb. 5.7 (a)) sowie das Verbinden und Einstellen eines Funktionsgenerators mit dem Oszilloskop über ein Koaxialkabel im fortge-

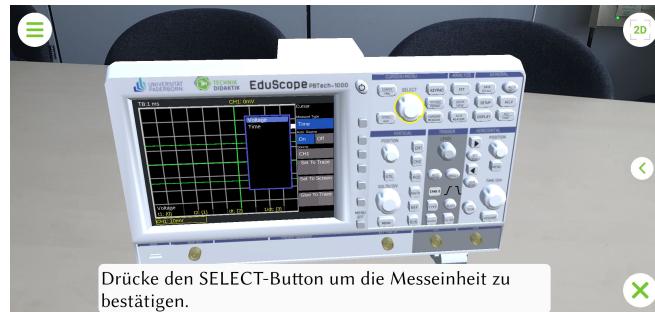
schrittenen Tutorial (Abb. 5.7 (b)). Dabei lernen die Studierenden, verschiedene Signale darzustellen und verinnerlichen die erforderlichen Handlungsschritte. Eine komplexere Anleitung führt die Nutzer:innen durch die verschiedenen Messfunktionen des Oszilloskops (5.7 (c)). Dies geschieht anhand eines angelegten Signals, um die praktische Anwendung der Messfunktion nachvollziehbar zu machen.



(a) Einfaches Tutorial: Instruktionen zur Bedienung der grundlegenden Funktionen des Oszilloskops



(b) Fortgeschrittenes Tutorial: Verbinden und Einstellen eines Funktionsgenerators mit einem Oszilloskop



(c) Experten Tutorial: Erläuterungen zur Nutzung der verschiedenen Messfunktionen des Oszilloskops

Abbildung 5.7: Level 2 mit den unterschiedlichen Tutorials zur einfachen Bedienung eines Oszilloskops (5.7 (a)), Verbindung und Einstellen eines Funktionsgenerators (5.7 (b)) und die Nutzung der komplexen Messmodi eines Oszilloskops (5.7 (c))

Dabei geht es nicht darum, wahllos Tasten zu betätigen, sondern gezielt zu verstehen, welche Bedienelemente welche Funktionen steuern. Viele Steuerungen sind nicht unmittelbar selbsterklärend – beispielsweise dienen Drehregler gleichzeitig als Druckknöpfe. So lässt sich über den Messfunktionsregler zwischen verschiedenen Messarten wechseln, während bei den Reglern für Empfindlichkeit und Zeitbasis die Messbereichseinheit¹⁸ eingestellt wird. Die beiden

¹⁸ Skalierung der Einheiten in unterschiedlichen Größenordnungen, z. B. Milli (m), Mikro (μ), Nano (n) oder Piko (p)

Tasten „Position“ setzen Verschiebungen (horizontal oder vertikal) des Signals zurück und zentrieren es erneut auf dem Display. Um einen effizienten Lernprozess zu gewährleisten, geben die Instruktionen daher präzise Hinweise zur erforderlichen Interaktionsart und dem zu erwartenden Effekt. Die Anleitungen sind möglichst kompakt formuliert und komplexere Aufgaben, wie die Nutzung der Messfunktionen, werden in überschaubare Teilschritte zerlegt, um Überforderung zu vermeiden. Zudem werden unwichtige Bereiche des Laborgeräts ausgeblendet, während relevante Bedienelemente visuell hervorgehoben werden, um den Fokus auf das Wesentliche zu lenken und die Orientierung zu erleichtern. Die Kombination aus klarer Instruktion und unmittelbarem Feedback greift Prinzipien des Behaviorismus auf, während die schrittweise Entlastung zugleich mit kognitivistischen Konzepten zur Steuerung von Lernprozessen übereinstimmt (Kapitel 5.3.1).

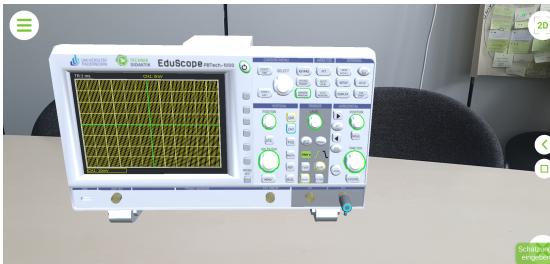
Level 3 – Aufgaben (Quiz):

In dieser Stufe lösen die Studierenden eine konkrete Aufgabe selbstständig und ohne Hilfestellung, basierend auf einer vorgegebenen Schaltung oder einem vorbereiteten Versuchsaufbau. Am Beispiel des Oszilloskops bedeutet dies, dass ein zufälliges Signal angelegt wird, während die Geräteeinstellungen so verändert sind, dass das Signal zunächst nicht sichtbar ist (siehe Abb. 5.8). Die Studierenden müssen durch gezielte Bedienung des Oszilloskops die erforderlichen Signalparameter (Signalform, Amplitude und Frequenz) ermitteln.

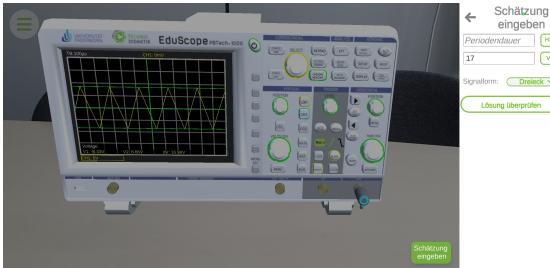
Im Vergleich zu Level 2, in dem die Interaktion durch klare Instruktionen stark eingeschränkt ist, bietet dieses Level deutlich mehr Handlungsspielraum. Dies entspricht dem konstruktivistischen Lernansatz, nach dem Wissen durch aktive Auseinandersetzung und Manipulation der Umwelt aufgebaut wird [Har14]. Studien zeigen, dass größere Freiheiten in der Aufgabenbewältigung zu besseren Lernergebnissen führen (vgl. z. B. [Har14] und [NW06]), weshalb sämtliche Funktionen des Oszilloskops uneingeschränkt nutzbar sind. Zusätzlich können Beispielfragen und vertiefende Aufgaben in diesem Level neue Impulse für weiterführende Herausforderungen in Level 4 liefern.

Level 4 – Freier Modus (Sandbox):

Dieses Level, bekannt als „Sandkasten“ (engl. *Sandbox*), bietet den Studierenden uneingeschränkten Zugang zu allen verfügbaren Geräten und Komponenten, um eigenständig Versuche zu gestalten, zu planen und durchzuführen (siehe Abb. 5.9). Der Begriff „Sandbox“ bezeichnet in der Informatik eine isolierte Testumgebung, in der Benutzer:innen frei experimentieren können, ohne das zugrunde liegende System zu beeinflussen [Hor23]. Übertragen auf das Lern-



(a) Zufällig angelegtes Signal am Kanal 1 des Oszilloskops

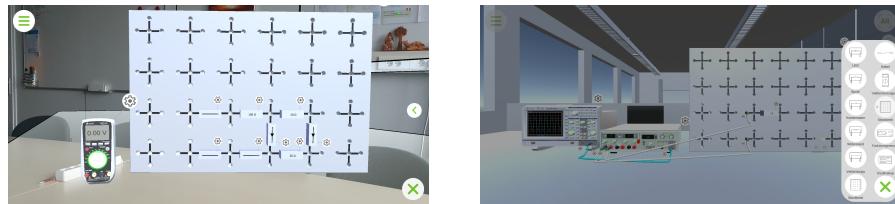


(b) Nutzung der Messfunktion zur Bestimmung der Amplitude

Abbildung 5.8: Level 3 und 4 mit einem Quiz zur Bestimmung der Signalparameter (5.8 (b)) eines zufällig generierten und am Oszilloskop verstellten Signals (5.8 (a))

setting ermöglicht dieses Level eine spielerische Erkundung der Laborgeräte, ohne das Risiko einer Beschädigung realer Hardware oder der App. Diese Stufe fördert damit die eigenständige Planung und Durchführung von Experimenten und eignet sich somit auch als Vorbereitung auf reale Laborversuche. Sie greift den zentralen Gedanken des Konstruktivismus auf, wonach Lernen besonders wirksam ist, wenn es selbstgesteuert, explorativ und praxisnah erfolgt. Durch die freie Exploration entwickeln die Studierenden ein zunehmendes Verständnis für die Laborgeräte und Bauelemente. Mit wachsender experimenteller Erfahrung automatisieren sich wiederum die erlernten Fertigkeiten schrittweise [EW19]. Nach dem vollständigen Durchlaufen aller vorherigen Level – vom Onboarding bis zum Quiz – wird die Sandbox zum Standardlevel der App. Um jedoch eine Orientierungslosigkeit zu vermeiden, enthält die App einen sogenannten „Empty State“ mit Hinweisen zu verfügbaren Funktionen der App (vgl. auch Abb. 7.9 in Kapitel 7.4.1). Dadurch können die Studierenden entweder ein Level wiederholen

oder direkt in der Sandbox arbeiten, indem sie virtuelle Geräte und Komponenten im realen Raum platzieren (vgl. Abb. 5.9).



(a) Freier Modus in AR mit Steckbrett und einem Vielfachmessgerät.

(b) Freier Modus in der 2D-Ansicht mit komplexem Aufbau aus Oszilloskop, Funktionsgenerator und Netzteil (Spannungsquelle) sowie Steckbrett.

Abbildung 5.9: Level 4 als Sandbox, indem Benutzer:innen beliebige Geräte einfügen und uneingeschränkt nutzen können, entweder in der AR- (5.9 (a)) oder der 2D-Ansicht (5.9 (b)).

5.4.3 Prüfungsmethoden

Im Gegensatz zu klassischen Ansätzen des Constructive Alignment, bei denen Prüfungsformen eine gleichwertige Rolle neben Lernzielen und Lernaktivitäten einnehmen, stehen sie in dieser Arbeit nicht im Zentrum. Der Fokus liegt auf der Vorbereitung und Unterstützung des Lernprozesses, nicht auf formalen Leistungsüberprüfungen. Stattdessen dienen die hier entwickelten „Quizze“ als selbstgesteuerte Wissenstandsprüfungen, die Lernende zur Reflexion ihres eigenen Verständnisses anregen. Der Gedanke der Bewertung tritt zurück, die Funktion der Unterstützung tritt in den Vordergrund.

Das erste Quiz in Level 3 ist eng an die Lernziele des Laborpraktikums A angebunden (vgl. Anhang S. IV). Es umfasst grundlegende Handlungsschritte wie die korrekte Einstellung von Empfindlichkeit und Zeitbasis sowie das Ablesen zentraler Signalparameter, mit und ohne Messfunktion des Oszilloskops. Die Lernenden können damit prüfen, ob sie die für das Praktikum notwendigen Basiskompetenzen beherrschen.

Spätere Quiz-Sequenzen greifen weitere Lernziele auf, die für fortgeschrittene Praktika entscheidend sind. Dazu zählen die Nutzung der Triggerfunktion (Laborpraktikum C), der Aufbau von Schaltungen auf dem Steckbrett sowie das strom- und spannungsrichtige Messen mit Vielfachmessgeräten. Auf diese Weise

begleiten die Quizze den Lernprozess über mehrere Stufen hinweg. Gleichzeitig ist die Umsetzung dieser zusätzlichen Funktionen technisch sehr anspruchsvoll und mit erheblichem Entwicklungsaufwand verbunden. Die Lernziele sind bewusst umfassend formuliert, jedoch besteht in dieser Arbeit nicht der Anspruch, sämtliche Inhalte vollständig zu realisieren. Vielmehr bilden sie eine Grundlage für spätere Erweiterungen und Weiterentwicklungen der App.

Parallel zu diesen individuellen Wissenstandsprüfungen werden Aufgaben zur Evaluation der späteren Wirksamkeit der Anwendung entwickelt (siehe Kapitel 9).

Die Prüfungsformen sind damit zwar Bestandteil des Gesamtkonzepts, ihr Stellenwert liegt hier aber primär in der Lernunterstützung und in der empirischen Evaluation der App.

5.5 Zusammenfassung und Reflexion

Zusammenfassung

In diesem Research Pentagon wird das didaktische Konzept vorgestellt, das so allgemein wie nötig in Bezug auf das technische Medium, aber so konkret wie möglich im Hinblick auf eine spätere Messbarkeit und Beurteilung der Zielerreichung gestaltet sein muss. Das Konzept basiert dabei auf dem didaktischen Modell des Constructive Alignment. Dieses Modell stellt sicher, dass Lernziele, Lehrmethoden und Prüfungsformen kohärent aufeinander abgestimmt sind. Damit wird zugleich die Forschungsfrage **F1** beantwortet, wie die Handhabung von Laborgeräten didaktisch effektiv vermittelt werden kann, da das Konzept eine systematische Verknüpfung von Lernzielen und Methoden sicherstellt. Zur Strukturierung der Lernziele dient die überarbeitete Taxonomie nach Bloom von Anderson und Krathwohl, die eine Einordnung entlang der Wissens- und kognitiven Prozessdimension ermöglicht. Diese Struktur macht das didaktische Konzept zugleich flexibel (**F2**), da es präzise genug ist, um eine zuverlässige Überprüfung der Zielerreichung zu ermöglichen, gleichzeitig aber offen bleibt für die Integration zusätzlicher Inhalte oder neuer Geräte, die in späteren Praktika relevant werden. Die Lernziele sind hierarchisch aufgebaut und ermöglichen eine schrittweise Vertiefung von der reinen Wissensaufnahme bis hin zur eigenständigen Problemlösung.

In Lernziel 1a und 1b sollen Studierende Laborgeräte sowie elektrotechnische Bauelemente identifizieren und deren Bauformen sowie Bezeichnungen verstehen. Das Verständnis der Wirkungsweise dieser Komponenten und ihrer Anwendung in Schaltungen steht im Fokus von Lernziel 2a und 2b. In 3a und 3b wird das erworbene Wissen angewendet, indem Studierende Messgeräte und Schaltungen gezielt nutzen. Lernziel 4 erweitert dies um die Analyse und Interpretation von Messergebnissen, insbesondere hinsichtlich Messfehlern und Bauteiltoleranzen. Schließlich bietet Lernziel 5 einen freien Experimentierraum, in dem Studierende eigenständig Schaltungen entwickeln und Experimente planen und durchführen können.

Die Umsetzung erfolgt entsprechend ebenfalls in mehreren didaktischen Stufen. Das Onboarding (Level 0) führt in die grundlegende Bedienung der App und die AR-Interaktion ein, um Einstiegshürden zu reduzieren. Level 1 vermittelt die zentralen Funktionen und Bedienelemente des Oszilloskops sowie dessen Anwendungsbereiche. In dieser Stufe bleiben die Studierenden zunächst passiv und nehmen grundlegende Informationen über Laborgeräte und elektrotechnische Komponenten auf. Auf der nächsten Stufe (Level 2) können sie anhand einer schrittweisen Anleitung verschiedene Funktionen selbst testen. Dabei wird in jeder dieser Anleitungen der Fokus immer auf ein bestimmtes Konzept gelegt, etwa das Verbinden eines Oszilloskops mit einem Funktionsgenerator oder die Nutzung der Messfunktion. Zur Wissensüberprüfung fordert ein Quiz (Level 3) dazu auf, die Kenngrößen eines zufällig angelegten Signals korrekt zu bestimmen. In dieser Phase müssen Studierende ihr Wissen aktiv anwenden, um eine klare Aufgabenstellung zu lösen. In der letzten Phase (Level 4) steht schließlich eine explorative Umgebung zur Verfügung, die uneingeschränkten Zugang zu allen virtuellen Laborgeräten und Komponenten bietet.

Dieser Aufbau fördert sowohl die Motivation als auch die Experimentierfreude und senkt zugleich mögliche Ängste vor den späteren Laborpraktika.

Im Kontext von AR zeigt sich darin ein tragfähiger Ansatz zur Gestaltung der App, da das Lernen in aufeinanderfolgenden Stufen – von passiver Informationsaufnahme über aktive Anwendung bis zu explorativem Experimentieren – geführt wird (F3).

Reflexion

Ein gutes didaktisches Konzept ist essenziell, um Lernprozesse gezielt zu steuern und den Erwerb von Kompetenzen zu unterstützen. Ohne eine Abstimmung

der Lehrmethoden an die Lernziele besteht die Gefahr, dass Inhalte unstrukturiert erlernt werden oder die kognitive Belastung für Lernende zu hoch ausfällt. Besonders in technologiegestützten Lernumgebungen – wie der entwickelten AR-App – ist eine klare didaktische Strukturierung entscheidend. Interaktive Elemente können Lernprozesse unterstützen, aber auch ablenken oder überfordern, wenn sie nicht sinnvoll integriert sind. Die hier gewählte Struktur, die von geführten Anleitungen über schrittweise Wissensanwendung hin zu freiem Experimentieren reicht, ermöglicht ein gezieltes und progressives Lernen. Sie stellt zudem sicher, dass Lernende nicht nur passiv Inhalte konsumieren, sondern aktiv in den Lernprozess eingebunden werden.

Fehlt eine theoretisch fundierte Herangehensweise, können Lernende sich in der Anwendung verlieren und keine gezielten Kompetenzen aufbauen. Dieser theoretische Teil steht daher vor der eigentlichen Entwicklung der AR-App, die im nächsten Research Pentagon (Kapitel 6) anhand verschiedener Prototypen in der Machbarkeitsstudie behandelt wird.

6

Machbarkeitsstudie

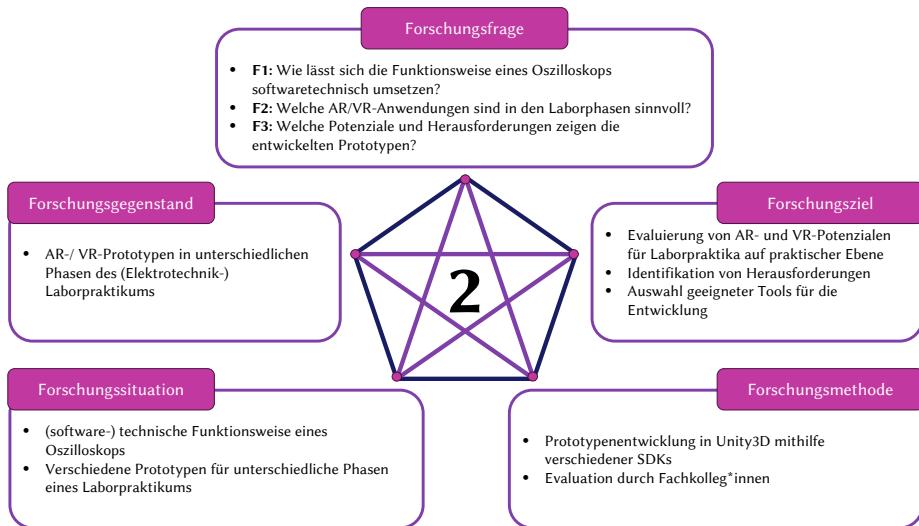


Abbildung 6.1: Research Pentagon zur Machbarkeitsstudie

6.1 Forschungsfragen und -ziel

Im Anschluss an die theoretische Analyse von AR-Potenzialen (vgl. Kapitel 4) und die Festlegung didaktischer Zielstellungen im vorherigen Research Pentagon (Kapitel 5) richtet sich der Fokus dieses Kapitels auf die praktische Erprobung. Ziel ist es, durch die Entwicklung erster Prototypen sowohl die technische Umsetzbarkeit als auch den pädagogischen Mehrwert von AR-Anwendungen im Kontext elektrotechnischer Laborpraktika zu untersuchen.

In diesem Research Pentagon wird die Lehrinnovation weiter konkretisiert, indem die Lernziele zur Bedienung des Oszilloskops ins Zentrum gestellt werden. Untersucht wird nicht nur, welche Technologien und Entwicklungsumgebungen dafür geeignet sind, sondern auch, in welchen Phasen eines Laborpraktikums

sich bestimmte Lernziele besonders gut mit AR- oder VR-Unterstützung fördern lassen. Zugleich gilt es, technische Herausforderungen frühzeitig zu identifizieren.

Zur Beantwortung dieser Zielsetzung dienen die folgenden Forschungsfragen:

- **F1:** Wie funktioniert ein Oszilloskop technisch, und wie lässt sich diese Funktionsweise abstrahiert und softwaretechnisch umsetzen?
- **F2:** In welchen Phasen eines Laborpraktikums sind AR- und VR-Anwendungen didaktisch sinnvoll und technisch umsetzbar?
- **F3:** Welche Entwicklungsumgebungen und Werkzeuge bieten sich für die Realisierung solcher Anwendungen an?
- **F4:** Welche Potenziale und Herausforderungen ergeben sich aus der prototypischen Umsetzung?

Die systematische Beantwortung dieser Fragen soll eine fundierte Einschätzung zur Machbarkeit und zum pädagogischen Nutzen immersiver Technologien in der Laborvorbereitung ermöglichen.

6.2 Forschungsmethode

Um die verschiedenen Prototypen zu entwickeln, sind zunächst grundlegende Voraussetzungen zu schaffen, die als Forschungssituation im folgenden Kapitel 6.3 beschrieben werden. Dazu gehören eine Einführung in die Entwicklungsumgebung *Unity3D* und ein Verständnis der objektorientierten Softwareentwicklung.

Der Forschungsgegenstand in diesem Research Pentagon beschreibt zunächst den technischen Aufbau und die Funktionsweise eines Oszilloskops. Auf dieser Grundlage lassen sich dessen Baugruppen in zwei unterschiedlichen Abstraktionsstufen softwaretechnisch modellieren. Darüber hinaus werden die verschiedenen Prototypen unter Zuhilfenahme unterschiedlicher *Software Development Kits (SDKs)*¹⁹ in Unity3D entwickelt und untersucht. Außerdem wird analysiert, welche Anwendungen in welcher Phase eines Laborpraktikums – vor oder während der Durchführung – sinnvoll eingesetzt werden können. Die entwickelten Prototypen werden anschließend unter Studierenden sowie Fachkolleg:innen vorgestellt, evaluiert und kritisch diskutiert.

¹⁹ Sammlung von Werkzeugen, Bibliotheken und Dokumentationen, die zur Entwicklung von Software für eine bestimmte Plattform oder Technologie erforderlich sind

6.3 Forschungssituation: Grundlagen für die Entwicklung der Prototypen

6.3.1 Entwicklungsumgebung Unity3D

Unity3D ist eine plattformübergreifende Spiel-*Engine*²⁰ und eine integrierte Entwicklungsumgebung (*Integrated Development Environment* – **IDE**). Mit ihr lassen sich Videospiele, Simulationen und andere interaktive 3D-, 2D- und AR-/VR-Anwendungen für eine Vielzahl von Betriebssystemen und Plattformen erstellen, darunter *Windows*, *macOS*, *Linux*, *Android*, *iOS*, *Web*, *Xbox*, *Playstation* etc. Unity3D nutzt die Skriptsprache *C#*, unterstützt auch *JavaScript* und bietet eine visuelle Editor-Oberfläche für die Nutzung von 2D- und 3D-Grafiken, Animationen und Audio [The23]. Speziell für die Entwicklung von AR-Anwendungen bietet es AR-Werkzeuge²¹ sowie SDKs z. B. *Vuforia*²², *wikitude*²³, *ARKit*²⁴ und *ARCore*²⁵. Diese Werkzeuge (engl. *tools*) ermöglichen es Entwickler:innen, 3D-Objekte in der realen Welt zu platzieren sowie deren Skalierung, Rotation und Positionierung präzise zu steuern. Zudem bieten die verfügbaren *AR-Features* aus den SDKs, wie Kamera-Überlagerung (engl. *camera overlay*), Bilderkennung und Bewegungsverfolgung, um eine nahtlose und realistische Integration der Objekte in der physischen Umgebung zu realisieren.

6.3.2 Objektorientierte Softwareentwicklung

In der objektorientierten Softwareentwicklung werden komplexe Gegenstände oder Sachverhalte auf das Wesentliche abstrahiert, indem aus realen Objekten Modelle mit den für Entwickler:innen relevanten Charakteristika erstellt werden [For02]. Diese Charakteristika umfassen *Attribute* und *Methoden* eines Objekts. Attribute sind Daten oder Eigenschaften, die dessen Zustand definieren, während Methoden als Funktionen das Verhalten und die Fähigkeiten des Objektes beschreiben. Objekte mit gleichen Attributen und Methoden werden zu einer

²⁰ Engines stellen grundlegende Funktionen für die Spieleentwicklung bereit, darunter z. B. Grafik-Rendering, Physiksimulation und Audioverarbeitung

²¹ <https://unity.com/unity/features/ar>

²² <https://www.ptc.com/de/about>

²³ <https://www.wikitude.com/about/>

²⁴ <https://developer.apple.com/augmented-reality/>

²⁵ <https://developers.google.com/ar>

Klasse zusammengefasst und können, ähnlich wie in der Biologie, diese an Unterklassen (Kinder) vererben oder von Oberklassen (Eltern) erben. Eine *Instanz* der Klasse bezeichnet ein Objekt mit konkreten Attributwerten und Methoden. Es hat sich die *Unified Modeling Language (UML)* Notation für die objektorientierte Spezifikation als Standard etabliert, die in der breiten Industrie und Wissenschaft Akzeptanz findet [For02]. Ein UML-Klassendiagramm visualisiert die wesentliche Abstraktion und Modellierung eines Objekts (vgl. z. B. Abb. 6.6). Im oberen Rechteck werden die Attribute mit dem jeweiligen Typ (z. B. Ganzzahl (int), Gleitkommazahl (float), Text (String) etc.) notiert. Im unteren Rechteck stehen alle Methoden mit den zu übergebenden Parametern und dem Ausgabetyp (z. B. void bei einer Methode ohne Ausgabe) (vgl. [For02]). Das Vorzeichen Minus (-) oder Plus (+) gibt die Sichtbarkeit eines Attributs oder einer Methode an. Private Attribute oder Methoden werden mit einem Minus gekennzeichnet und sind nur innerhalb der eigenen Klasse zugänglich, während öffentliche Elemente – markiert mit einem Plus – hingegen von jeder Stelle außerhalb der Klasse aufgerufen werden können.

6.4 Forschungsgegenstand: Entwicklung der Prototypen

6.4.1 Das Oszilloskop – Technischer Aufbau und Funktionsweise

Ein Oszilloskop dient nicht nur dazu, den zeitlichen Verlauf einer Spannung U über die Zeit t ($U(t)$) aufzuzeichnen und zu visualisieren, es kann auch eine Spannung U_1 in Abhängigkeit einer weiteren Spannung U_2 ($U_1 = f(U_2)$) darstellen. Als vielseitiges Messinstrument wird es oft auch eingesetzt, um nicht-elektrische Messgrößen, wie z. B. mechanische - und Schallschwingungen oder Kräfte darzustellen, wenn diese zuvor durch geeignete Wandler in proportionale elektrische Spannungen umgewandelt werden. Aufgrund sinkender Entwicklungskosten bei gleichzeitig performanterer Elektronik und gesteigerter Auflösung haben moderne *digitale Speicheroszilloskope (DSO)* die klassischen *analoge Oszilloskope (AO)* nahezu vollständig abgelöst. DSOs bieten zudem erweiterte Signalverarbeitungs- und -analysefunktionen durch das Vorhalten der Messwerte im Speicher [EKS16]. Trotz grundlegender Unterschiede in der Funktionsweise von AO und DSO sind die Bedienelemente weitgehend identisch geblieben.

Für das Verständnis der Funktionsweise eines Oszilloskops und dessen spätere Abstraktion sowie Programmierung ist es notwendig, die zugrunde liegenden Baugruppen und deren Zusammenwirken zu verstehen. Dies lässt sich leichter anhand eines AOs nachvollziehen, da dessen Aufbau und Funktionsweise weniger komplex sind.

Die folgende Abb. 6.2 stellt vereinfacht den schematischen Aufbau eines Analogoszilloskops dar, mit den dahinterliegenden, grundlegenden physikalischen Prinzipien.

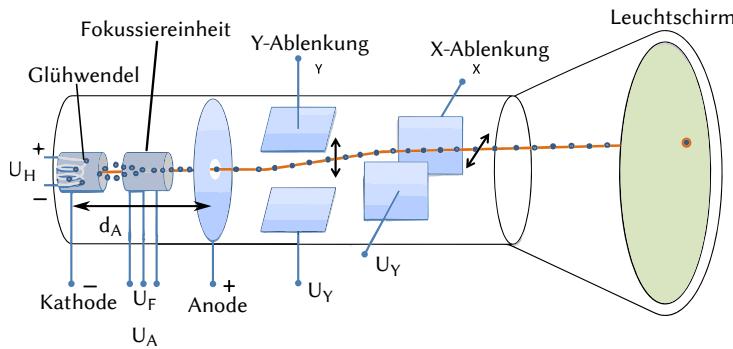


Abbildung 6.2: Schematischer Aufbau mit dem grundlegenden physikalischen Funktionsprinzip. Quelle: Eigene Darstellung, angelehnt an <https://www.oszilloskope.net>

Im linken Teil der Röhre befindet sich ein Glühwendel innerhalb des Wehneltzylinders, der als Kathode fungiert und auf Massepotenzial liegt. Der Glühwendel wird durch Anlegen einer Heizspannung U_H elektrisch beheizt, um Elektronen durch Glühemission aus der Anode freizusetzen [EKS16]. Im Abstand d_A zur Kathode befindet sich die positiv geladene Anode, die in der Mitte durchbohrt ist. Durch Anlegen einer hohen Spannung ($U_A = 1000V$) zwischen der Kathode und der Anode wird ein elektrisches Feld $E_A = U_A/d_A$ erzeugt. Auf die freigesetzten Elektronen wirkt damit eine Kraft F_A , die proportional zur Elektronenladung e und der Stärke des elektrischen Feldes E_A ist ($F_A = e * E_A$), sodass sie durch die Bohrung der Anode hin zum Bildschirm des Oszilloskops beschleunigt werden. Beim Auftritt an den phosphoreszierenden Leuchtschirm wird ein sichtbarer Punkt erzeugt, dessen Größe durch eine Spannung U_F an der Fokussiereinheit eingestellt werden kann (vgl. [EKS16] und [Oss19]). Im mittleren Teil, zwischen der Anode und dem Leuchtschirm, befinden sich je ein Paar aus horizontal und

vertikal angeordneten Plattenkondensatoren, die eine X- bzw. Y-Ablenkung des Elektronenstrahls je nach angelegter Spannung ermöglichen. Ebenso wie für die Beschleunigung der Elektronen wirkt hier ebenfalls eine vertikale bzw. horizontale Kraftwirkung $F_Y = e * E_Y = e * U_Y/d_Y$ bzw. $F_X = e * E_X = e * U_X/d_X$ mit U_Y für die Spannung an den Y-Ablenkplatten und d_Y den Abstand der Platten zueinander. Beim XY-Betrieb wird der Spannungsverlauf eines Signals in Abhängigkeit eines zweiten Eingangssignals visualisiert, d. h. $U_Y(U_X)$. Im Y(t)-Betrieb wird die angelegte Spannung aus Kanal 1 (**CH1**) bzw. Kanal 2 (**CH2**) des Oszilloskops als Funktion der Zeit t dargestellt, d. h. $U_{Y1}(t)$ bzw. $U_{Y2}(t)$ [Oss19]. Um dies zu erreichen, wird über einen Kippgenerator eine Sägezahnfunktion mit einer Periodendauer t_d an die X-Ablenkplatten gelegt (siehe Abb. 6.3).

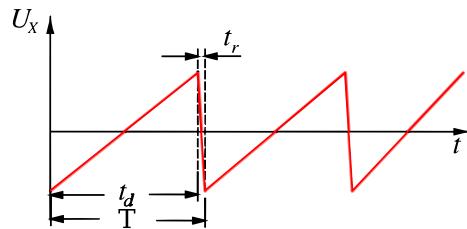


Abbildung 6.3: Sägezahnfunktion des Kippgenerators als Eingangsspannung U_X für die X-Ablenkplatten. Quelle: überarbeitete Darstellung aus [Oss19]

Im Zeitintervall t_d bewegt sich der Elektronenstrahl gleichförmig von der linken zur rechten Seite des Bildschirms. Während der Zeit t_r kehrt er von der rechten zur linken Seite zurück. Durch Anlegen eines großen negativen Potenzials an den Wehneltzylinder wird beim Rücklauf der Elektronenstrahl unterdrückt, sodass kein Leuchtfleck am Schirm erzeugt wird [EKS16].

6.4.2 Das Oszilloskop – Softwaretechnischer Aufbau und Funktionsweise in Kombination mit dem Funktionsgenerator

Abstraktionsstufe 1: Pseudocode

Wie in der schematischen Darstellung in Abb. 6.2 gezeigt, lässt sich das grundlegende Prinzip eines Oszilloskops nachvollziehen, ohne die zugrunde liegenden notwendige physikalische Funktionsweise vollständig erfassen zu müssen. Aufbauend darauf können nun diese zuvor identifizierten und beschriebenen

Eigenschaften und Funktionen der jeweiligen Baugruppen eines Oszilloskops abstrahiert und in einem UML-Klassendiagramm modelliert werden. Dieses UML-Klassendiagramm dient wiederum als Grundlage für die spätere Programmierung des Oszilloskops. Die Entwicklung ist hier beispielhaft in der Programmiersprache Python realisiert. Für ein besseres Verständnis wird auch das Signal mittels eines Funktionsgenerators im Modell abgebildet (Abb. 6.4). Denn während für die technische Erläuterung des Oszilloskops das Signal und die Signalquelle von geringer Bedeutung sind, ist der Funktionsgenerator bei der Abstraktion im UML-Diagramm erforderlich, um die Signalquelle korrekt zu modellieren und die Interaktionen innerhalb des Systems darzustellen.

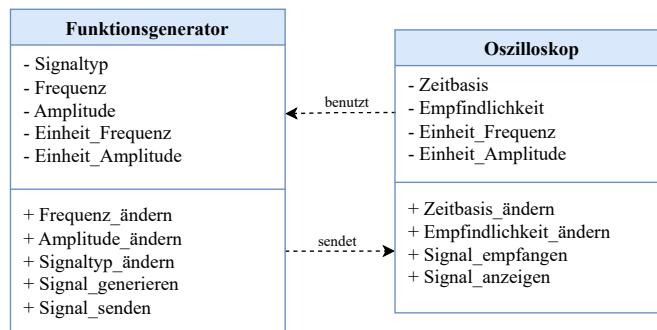


Abbildung 6.4: UML-Klassendiagramm eines Oszilloskops und eines Funktionsgenerators auf niedrigster (erster) Abstraktionsebene.

Ein Funktionsgenerator kann ein Signal erzeugen, das über die Eigenschaften *Signaltyp*, *Frequenz* und *Amplitude* verfügt. Die Frequenz wird entweder in Hz oder alternativ als Periodendauer in s bzw. ms angegeben; die Amplitude in V oder mV. Über entsprechende Bedienelemente lassen sich diese Parameter individuell anpassen und das erzeugte Signal senden.

Ein Oszilloskop besitzt eine *Empfindlichkeit* und eine *Zeitbasis* mit den entsprechenden Einheiten. Es empfängt Signale von einem Funktionsgenerator und stellt sie anhand der zuvor festgelegten Parameter dar. Analog zum Funktionsgenerator lassen sich Empfindlichkeit und Zeitbasis anpassen. Jede Änderung einer Eigenschaft am Funktionsgenerator erfordert das erneute Senden des Signals, damit das Oszilloskop die aktuellen Werte erfassen und entsprechend anzeigen kann.

Abstraktionsstufe 2: Einfache Klassen in Python-Code

Im nächsten Detaillierungsgrad werden die Eigenschaften und Funktionen des Funktionsgenerators und Oszilloskops näher spezifiziert. Dabei wird festgelegt, welche Datentypen die Attribute besitzen, welche Parameter an die Methoden der jeweiligen Klassen übergeben werden und welche Rückgabewerte diese liefern. Abb. 6.5 zeigt das detaillierte Klassendiagramm beider Geräte auf der zweiten Abstraktionsstufe.

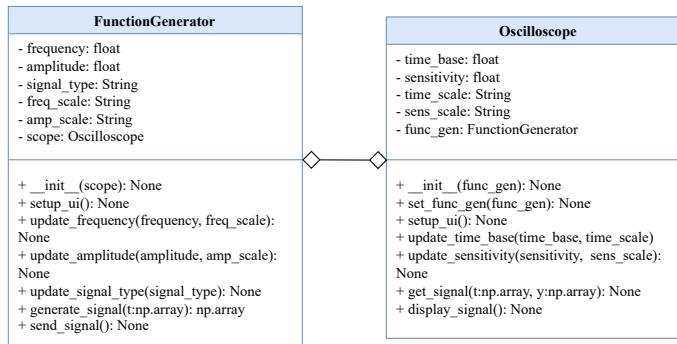


Abbildung 6.5: UML-Klassendiagramm eines Oszilloskops und Funktionsgenerator auf zweiter Abstraktionsstufe

Es ist erkennbar, dass sich sowohl die Attribute als auch die Methoden der Laborgeräte aus Abb. 6.4 in dieser Phase exakt wiederfinden lassen. Allerdings müssen zusätzliche Attribute und Methoden implementiert werden, um eine Funktionsfähigkeit des Codes sicherzustellen. Eine zentrale Ergänzung in beiden Klassen ist die Methode `__init__()`, der sogenannte *Konstruktor*, der in allen objektorientierten Sprachen eine spezielle Funktion erfüllt [For02].

Beim Aufruf der Klasse mit den entsprechenden Parametern wird durch den Konstruktor ein Objekt erstellt und seine Attribute mit initialen Werten belegt, wodurch eine konkrete Instanz der Klasse entsteht. Beispielsweise setzt `__init__` im `FunctionGenerator` die Attribute wie `signal_type` und speichert eine Referenz (mit dem Übergabeparameter `scope`) zur `Oscilloscope`-Klasse. Konstruktoren werden im UML-Klassendiagramm üblicherweise nicht aufgelistet, sind jedoch für ein besseres Verständnis des Konzepts in Abb. 6.5 exemplarisch dargestellt [For02; MH08].

Außerdem verfügen beide Klassen über die Methode `setup_ui()`, um die Bedienelemente in Python zu generieren. Zwischen den Klassen `FunctionGenerator` und `Oscilloscope` herrscht eine zirkuläre Aggregationsbeziehung, die im UML-Diagramm durch eine Linie mit einem Diamantende gekennzeichnet ist [Nis22a; Nis22b]. Dies bedeutet, dass beide Klassen jeweils eine Instanz der anderen enthalten, was zu einem „Henne-Ei-Problem“ führt: Denn eine `Oscilloscope`-Instanz benötigt eine Referenz auf einen `FunctionGenerator` und umgekehrt. Um dieses Problem zu lösen, wird in der `Oscilloscope`-Klasse die Hilfsmethode `set_func_gen(func_gen)` definiert (vgl. Anhang S. XIV). Dadurch entsteht zunächst eine Instanz `scope` mit einem leeren Parameter, die anschließend für die Instanziierung von `FunctionGenerator` dient. Mit dem späteren Aufruf von `set_func_gen(func_gen)` wird das zuvor leere Attribut `func_gen` in der `Oscilloscope`-Klasse gesetzt.

Die konkrete Umsetzung des UML-Klassendiagramms in Python ist im Anhang S. XIV der Arbeit dokumentiert und wird hier nicht weiter erläutert. Bereits auf dieser Abstraktionsstufe ist ersichtlich, dass mit wachsender Funktionalität und einer zunehmenden Anzahl an Geräten auch die Klassen zunehmend komplexer und unübersichtlicher werden. Besonders problematisch ist dies, wenn sich Methoden wie `setup_ui()` in mehreren Klassen wiederholen, wodurch der Code an Klarheit verliert [For02].

Abstraktionsstufe 3: Modularität durch abstrakte Klassen in Python-Code

Um die Komplexität eines Programms zu reduzieren, seine Modularität zu erhöhen und damit auch die Wartbarkeit zu verbessern, sollte eine strikte Trennung der Verantwortlichkeiten zwischen den Klassen herrschen [For02]. Darauf wird im nächsten Abstraktionsschritt die Hilfsklasse `Display` eingeführt, die für die Darstellung der Bedienelemente und des Signals zuständig ist. Zusätzlich dient die abstrakte Klasse `MainApp` als zentrale Steuerungseinheit für die Anwendung (vgl. Abb. 6.6). Im Konstruktor von `MainApp` werden Instanzen von `FunctionGenerator`, `Oscilloscope` und `Display` erzeugt. Die Instanz von `Display` erhält als Parameter die zuvor erstellten Objekte `scope` und `func_gen`, wodurch eine klare Trennung zwischen Steuerungslogik und Darstellung gewährleistet wird. Das folgende UML-Klassendiagramm in Abb. 6.6 visualisiert diesen Abstraktionsschritt.

Die Attribute der Klassen `FunctionGenerator` und `Oscilloscope` bleiben unverändert. Allerdings entfällt die direkte Instanziierung der jeweils anderen Klassen, da sie – wie zuvor erwähnt – in die Hauptklasse `MainApp` ausgelagert

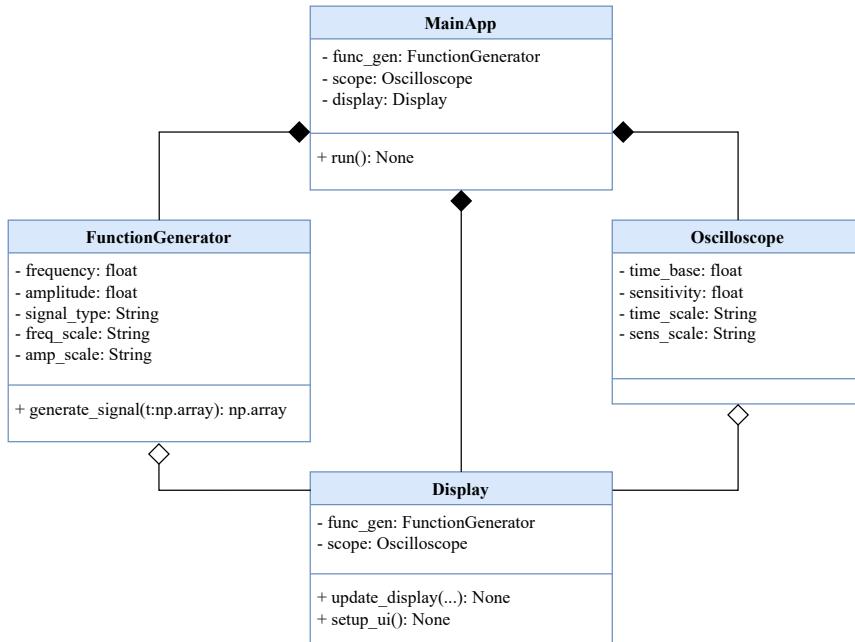


Abbildung 6.6: UML-Klassendiagramm eines Oszilloskops und Funktionsgenerators mit der abstrakten Klasse `MainApp` und `Display`

werden. Dadurch herrscht zwischen `FunctionGenerator` und `Oscilloscope` keine direkte Beziehung mehr. Stattdessen weist nun jede Klasse eine Kompositionsbeziehung zur `MainApp`-Klasse auf. Das bedeutet, dass sie ein fester Bestandteil davon ist und ohne diese nicht existieren kann. Die Beziehung folgt dem *Ist-Teil-von-Prinzip*, wodurch beim Löschen einer `MainApp`-Instanz auch alle zugehörigen Objekte entfernt und der Speicher freigegeben wird [MH08]. Die Klasse `Display` steht hingegen in einer Aggregationsbeziehung zu `Oscilloscope` und `FunctionGenerator`, da sie Instanzen beider Klassen enthält [Nis22a; Nis22b]. Dies ermöglicht den Zugriff auf deren Attribute über die Methode `update_display`, ohne dass eine wechselseitige Abhängigkeit entsteht.

Die Methode `generate_signal` bleibt in der Klasse `FunctionGenerator` erhalten, da sie für die Erzeugung des Signals verantwortlich ist.

```

1  def generate_signal(self, t):
2      if self.freq_scale == 's':
3          frequency = 1 / self.frequency
4      else:
5          frequency = self.frequency
6
7      if self.amp_scale == 'mV':
8          amplitude = self.amplitude / 1000
9      else:
10         amplitude = self.amplitude
11
12     if self.signal_type == 'Sinus':
13         return self.amplitude * np.sin(2 * np.pi *
14             ↪ self.frequency * t)
14     elif self.signal_type == 'Rechteck':
15         return self.amplitude * np.sign(np.sin(2 * np.pi *
16             ↪ self.frequency * t))
16     elif self.signal_type == 'Dreieck':
17         return self.amplitude * 2 * np.arcsin(np.sin(2 * np.pi *
18             ↪ self.frequency * t)) / np.pi
18     elif self.signal_type == 'Sägezahn':
19         return self.amplitude * 2 * (t * self.frequency -
20             ↪ np.floor(0.5 + t * self.frequency)))

```

Aus dem obigen Code geht hervor, dass die Methode den Parameter t entgegennimmt, was eine Liste²⁶ von Zeitpunkten repräsentiert (Zeile 1). Zunächst erfolgt eine Überprüfung der eingestellten Einheit für das Signal mittels zweier `if-else`-Anweisungen (Zeile 2–5). Bei einer Änderung der Einheit rechnet der Code automatisch um, beispielsweise von Hz in s durch 1/Hz oder von V nach mV durch Multiplikation mit 1.000 (Zeile 7–10). Die nachfolgenden `if`-Anweisungen (Zeile 12–19) generieren mithilfe der mathematischen Bibliothek NumPy die entsprechenden Signale basierend auf dem gewählten Signaltyp. Anstatt die einzelnen Funktionen manuell zu berechnen, lassen sich die vordefinierten Signalformen der `scipy`-Bibliothek direkt nutzen. Die Methode gibt schließlich ein *Array* als Rückgabewert zurück, das die berechneten Werte für die jeweiligen Zeitpunkte t enthält (entweder Zeile 13, 15, 17 oder 19).

²⁶ in der Programmierung als *Array* bezeichnet

```

1  from scipy import signal
2  ...
3  ...
4  return self.amplitude * signal.sawtooth(2 * np.pi *
   ↪ self.frequency * t)

```

Die Aktualisierung (*update*) des Signals, also die Übergabe der Benutzereingaben über die bereitgestellten Bedienelemente, erfolgt in der Klasse Display.

```

1  def update_display(self, signal_type='Sinus', frequency=1.0,
   ↪ freq_scale='Hz', amplitude=1.0, amp_scale='V',
   ↪ sensitivity=1.0, sens_scale='V', time_base=1.0,
   ↪ time_scale='s'):
2      self.func_gen.signal_type = signal_type
3      self.func_gen.frequency = frequency
4      self.func_gen.freq_scale = freq_scale
5      self.func_gen.amplitude = amplitude
6      self.func_gen.amp_scale = amp_scale
7
8      self.scope.sensitivity = sensitivity
9      self.scope.sens_scale = sens_scale
10     self.scope.time_base = time_base
11     self.scope.time_scale = time_scale
12
13     # Zeitvektor basierend auf der Zeitbasis und deren Skala
14     if time_scale == 'ms':
15         t_max = 10 * time_base / 1000 # Konvertierung von
   ↪ ms in s
16     else:
17         t_max = 10 * time_base
18         t = np.linspace(0, t_max, 1000)
19
20     # Signal generieren
21     y = self.func_gen.generate_signal(t)
22
23     # Sensibilität und deren Skala berücksichtigen
24     if sens_scale == 'mV':
25         y = y / (sensitivity * 1000) # Konvertierung von mV
   ↪ in V

```

```
26     else:
27         y = y / sensitivity
28
29     # Darstellung des Plots
30     plt.figure(figsize=(10, 6))
31     plt.plot(t, y)
32     plt.grid(True, which='both', linestyle='--',
33             linewidth=0.5)
34     plt.title(f'{self.func_gen.signal_type}-Signal')
35     plt.xlabel('Time')
36     plt.ylabel('Voltage')
37     plt.ylim(-5, 5)
38     plt.legend([f'{self.scope.time_base}'
39                ↪ {self.scope.time_scale}/Div,
40                ↪ {self.scope.sensitivity}
41                ↪ {self.scope.sens_scale}/Div], loc='lower right')
42     plt.show()
```

Die Methode `update_display` empfängt alle relevanten Attribute aus den Klassen `Oscilloscope` und `FunctionGenerator` als Parameter und visualisiert das Signal mit der Bibliothek `matplotlib` (Zeile 1 und 30–38). Dazu werden zunächst die Attribute `func_gen` und `scope` mit den aktuellen Werten aus `MainApp` belegt (Zeile 2–11). Anschließend wird die Einheit für die Zeitbasis des Oszilloskops überprüft (Zeile 14 bzw. 16) und der Zeitvektor `t` mit `t = np.linspace(0, t_max, 1000)` entsprechend umgerechnet (Zeile 15 bzw. 17). Die Funktion `np.linspace` aus der NumPy-Bibliothek erzeugt ein Array von gleichmäßig verteilten Werten über ein spezifiziertes Intervall; von 0 bis `t_max` unterteilt in 1.000 gleich große Abschnitte (Zeile 18). Im nächsten Schritt werden die Y-Werte des Signals berechnet, indem die Methode `generate_signal` die Zeitwerte `t` als Übergabeparameter aufruft und den Rückgabewert in das Array `y` schreibt (Zeile 21). Wie zuvor beschrieben, erfolgt eine Anpassung der Einheiten für die Empfindlichkeit des Oszilloskops, um die entsprechenden Y-Werte zu konvertieren (Zeile 24–27).

Für die Visualisierung des Signals kommt wieder die Bibliothek `matplotlib.pyplot` zum Einsatz. Da der Code zur Darstellung hier nicht im Fokus steht, wird auf die offizielle Dokumentation²⁷ verwiesen. Auch die Methode `setup_ui` ist nicht weiter erläutert, da sie lediglich mit der Bibliothek `ipywidgets` die Bedienelemente für die jeweiligen Attribute generiert und zugehörige Werte direkt an die `update_display`-Methode übergibt.

²⁷ siehe https://matplotlib.org/stable/api/pyplot_summary.html

Der fertig kompilierte Code ist in der folgenden Abb. 6.7 im *Jupyter Notebook*²⁸ dargestellt. Die Bedienelemente, die über `ipywidgets` generiert werden, erlauben eine direkte Anpassung der Parameter, während die Visualisierung des Signals in Echtzeit aktualisiert wird.

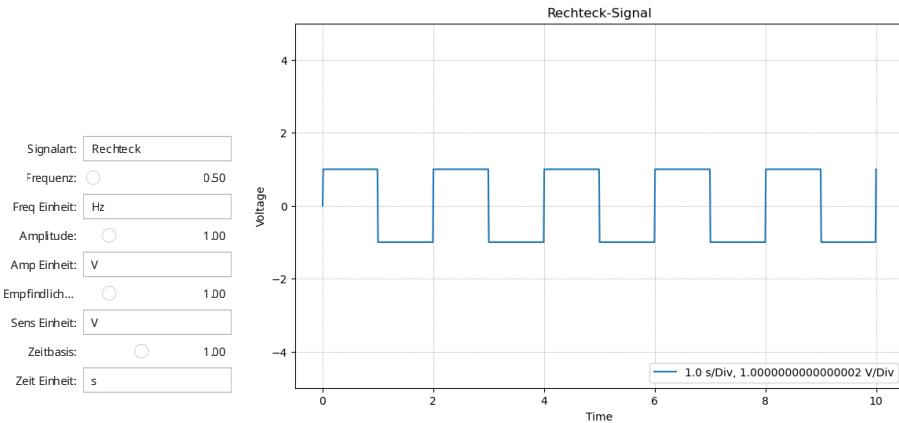


Abbildung 6.7: Echtzeit-Visualisierung von Signalen am Oszilloskop-Display mit interaktiven Bedienelementen für das Oszilloskop und den Funktionsgenerator in Jupyter Notebook

6.4.3 AR-Prototypen

Die Übersicht in Abb. 6.8 zeigt die in diesem Research Pentagon entwickelten AR- und VR-Prototypen, gegliedert nach Darstellungs- bzw. Nutzungsform, eingesetzten SDKs und Fokus der Anwendung. Eine Übersicht des gesamten Entwicklungsprozesses befindet sich in Anhang S. XXI. Alle Versionen und das zugehörige Änderungsprotokoll (`change.log`) sind im digitalen Anhang enthalten.

Im folgenden Kapitel 6.4.3 wird näher auf diese Prototypen eingegangen und untersucht, wie sie sich sinnvoll in den verschiedenen Phasen eines Laborpraktikums einsetzen lassen – etwa zur Vorbereitung oder während des Praktikums.

²⁸ Eine Open-Source-Webanwendung, die das Erstellen und Teilen von Dokumenten ermöglicht, welche Code, Gleichungen, Visualisierungen und Markdown-Texte enthalten. <https://jupyter.org>

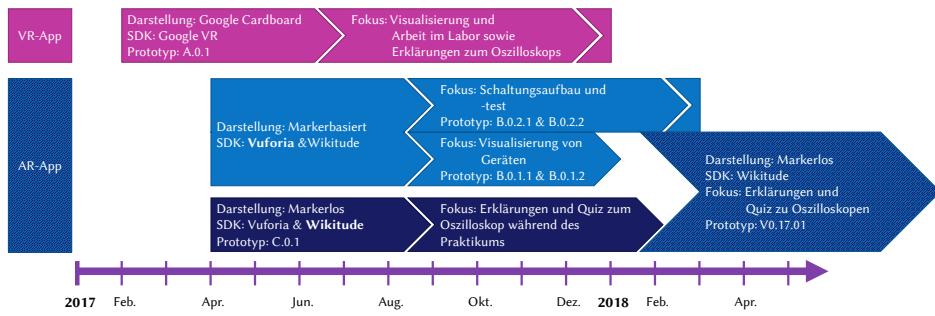


Abbildung 6.8: Überblick über Darstellungs- bzw. Nutzungsform, genutzte SDKs und Schwerpunkt der entwickelten Prototypen

Vor dem Praktikum

Visualisierung und Arbeit im Labor: Zu Beginn ist die Einführung in die Bedienung der Laborgeräte sowohl als AR- als auch als VR-App umgesetzt worden. Letztere ist so konzipiert, dass sie mithilfe des *Google Cardboard*²⁹ Projektes kostenlos nutzbar ist, indem eine Halterung aus Pappe (*Cardboard*) gedruckt und ausgeschnitten wird. Eine stereoskopische Kamera in Unity3D sorgt dafür, dass das Smartphone als Ausgabegerät innerhalb des *Cardboard Viewers* funktioniert (vgl. Abb. 6.9 (a)).



Abbildung 6.9: Ansicht aus der VR-App mittels eines *Google Cardboards*

Der große Vorteil der VR-Variante liegt darin, dass sich Ablenkungen aus der realen Umgebung ausschließen und die Aufmerksamkeit gezielt auf die Inhalte oder relevanten Bereiche im virtuellen Labor lenken lässt. Um jedoch auch die Ablenkung innerhalb der App gering zu halten, ist sie bewusst mini-

²⁹ <https://arvr.google.com/cardboard/>

malistisch konzipiert. Ein virtueller Tutor liefert relevante Informationen zu den dargestellten Laborgeräten, sobald ein entsprechender Bereich fokussiert wird (vgl. Abb. 6.9 (b)) und kann darüber hinaus auch auf sicherheitsrelevante Aspekte im Labor hinweisen. Allerdings hat sich bereits hier gezeigt, dass die Interaktionsmöglichkeiten mit der App stark eingeschränkt sind. Das Cardboard verfügt lediglich über einen seitlichen Button, der eine Berührung auf dem Bildschirm im Fokuspunkt der Kamera auslöst. Zusätzlich treten Probleme wie Übelkeit (*motion sickness*) auf, was durch die häufigen Kopfbewegungen oder die Diskrepanz zwischen den visuellen Eindrücken und dem fehlenden körperlichen Bewegungsgefühl ausgelöst wird³⁰. Weitere Einschränkungen umfassen unscharfe Darstellungen durch fehlende Linsen im Cardboard sowie fehlenden Tragekomfort, insbesondere für Brillenträger:innen. Diese Nachteile überwiegen den erhofften Motivations- und Wissenszuwachs durch die Nutzung der App, weshalb die Weiterentwicklung der VR-Version eingestellt wird.

Visualisierung und Bedienung von Laborgeräten: Die für diese Phase des Praktikums entwickelten Prototypen (Prototyp B.0.1.x) konzentrieren sich ausschließlich auf die Visualisierung von Laborgeräten im realen Raum. Sie dienen dazu, die Performance und Stabilität der beiden zu dem Zeitpunkt verfügbaren SDKs (Wikitude und Vuforia) in Verbindung mit verschiedenen Markertypen zu prüfen (vgl. Abb. 6.10 mit Vuforia).



(a) Detailliertes 3D-Modell eines Oszilloskops ohne Textur und Funktion auf einem Bild des Gerätes als Marker (Prototyp: B.0.1.1)



(b) Visualisierung eines Vielfachmessgeräts mit Textur, ohne Funktion auf einem kontrastreichen Marker (Prototyp: B.0.1.2)

Abbildung 6.10: Visualisierung von Laborgeräten (Vielfachmessgerät 6.10 (b) und Oszilloskop 6.10 (a)) auf Markern mit dem Vuforia-SDK.

³⁰ <https://virtualspeech.com/blog/motion-sickness-vr>

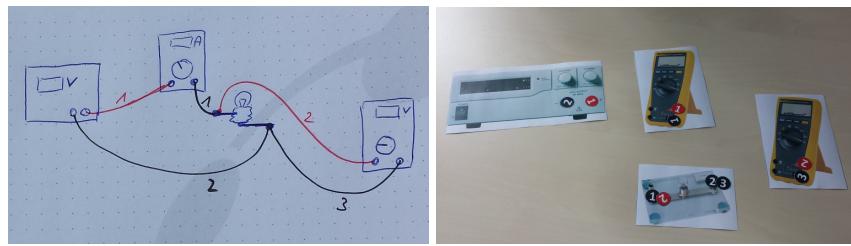
In einem *Worst-Case*-Szenario mit einem detaillierten 3D-Modell und einem Gerätemarker mit wenigen erkennbaren Features (vgl. Abb. 6.10 (a)), erweist sich die Visualisierung sowohl mit Wikitude als auch mit Vuforia als sehr instabil. Selbst unter optimalen Bedingungen mit einem einfachen 3D-Modell, einer Textur und einem kontrastreichen Marker (vgl. Abb. 6.10 (b)) flackert das 3D-Objekt auf dem Smartphone, wodurch eine Interaktion mit den Bedienelementen am Laborgerät nicht zuverlässig möglich ist. Trotz dieser Einschränkungen eignen sich solche Prototypen gut, um theoretisches und praktisches Wissen zu verknüpfen. Die Überlagerung abstrakter Schaltsymbole mit virtuellen Darstellungen realer elektrotechnischer Komponenten kann helfen, Verständnisschwierigkeiten zu überwinden. Ein häufig genanntes Problem besteht darin, dass Studierende zwar Schaltsymbole kennen, jedoch keine Vorstellung von der konkreten physischen Erscheinungsform der entsprechenden Geräte oder Bauteile haben – etwa einer Diode. Zudem zeigt sich in der späteren Evaluation, dass Vuforia eine bessere Performance bei der markerbasierten Augmentierung bietet, während sich markerlose Darstellungen mit Wikitude einfacher realisieren lassen. Aufgrund dieser Erkenntnisse wird für die weitere Entwicklung, u. a. das Onboarding (vgl. Kapitel 7), das Wikitude-SDK verwendet.

Schaltungsaufbau und Experimentieren: AR-Apps können die Planung und digitale Erprobung von Schaltungen bereits vor dem eigentlichen Praktikum ermöglichen. Die Grundidee besteht darin, vorab einen möglichen Versuchsaufbau zu konzipieren und zu skizzieren (vgl. Abb. 6.11 (a)). Anschließend wird die Schaltung mithilfe passender Marker so ausgelegt, dass sie in einer passenden AR-App visualisiert und getestet werden kann (vgl. Abb. 6.11 (b) und 6.11 (c)).

Durch interaktive Elemente oder Hinweise innerhalb der App kann validiert werden, ob ein geschlossener Stromkreis entstanden ist. Dies geschieht beispielsweise durch das Betätigen eines Schalters oder das Einschalten der Spannungsquelle.

In der ersten Version des Prototyps B.0.1.1 sowie B.0.2.1 besitzen die Bilder nicht ausreichend Merkmale, um virtuelle Objekte stabil darauf zu platzieren. Daher sind in der nachfolgenden Version B.0.2.2 QR-Codes³¹ als Marker zum Einsatz gekommen, die in der Mitte eine kleine Abbildung des jeweiligen Geräts sowie ein kontrastreiches Muster enthalten. Dieser Prototyp ist in Abb. 6.12 dargestellt und verdeutlicht, dass selbst für eine einfache Schaltungen, bestehend aus einem Verbraucher (Glühlampe), einer Spannungsquelle und den zugehörigen Leitungen, insgesamt sechs Marker erforderlich sind.

³¹ Quick Response Code (QR-Code)



(a) Planung und Skizze einer Schaltung (b) Durchführung mittels Marker



(c) Möglicher Test in AR

Abbildung 6.11: Die Idee: Planung und Skizze einer Schaltung (6.11 (a)), Durchführung durch passendes Auslegen von Markern (6.11 (b)) und Test in der möglichen AR-Anwendung (6.11 (c)) (Prototyp: B.0.2.1).



(a) Aufbau und Visualisierung eines einfachen Schaltkreises mit Markern (b) Test der Schaltung in AR

Abbildung 6.12: Die Realisierung: Aufbau einer einfachen Schaltung mittels QR-Codes als Marker mit ausgeschaltetem (6.12 (a)) und aktivem Netzteil (6.12 (b)) (Prototyp: B.0.2.2)

Bereits an diesem Punkt zeigt sich, dass die App-Performance mit jedem zusätzlichen Marker spürbar abnimmt. Der hohe rechnerische Aufwand der SDKs zur Identifizierung der Marker und Platzierung der entsprechenden 3D-Modelle stellt dabei die Hauptursache dar. Zudem führt die steigende Anzahl an Markern zu einer zunehmenden Instabilität des Gesamtsystems, was durch häufige Abstürze der App bemerkbar ist. Auch können einige Marker nicht zuverlässig erkannt werden, etwa wenn sie sich außerhalb des begrenzten Schärfebereichs der Kamera des mobilen Endgerätes befinden. Die Unsicherheit darüber, ob eine fehlerhafte Schaltung auf eine falsche Platzierung der Marker oder auf ein Systemversagen durch mangelnde Markererkennung zurückzuführen ist, kann aus der Studierendensicht sehr demotivierend wirken und den Lernprozess erschweren. Folglich wird auch die Weiterentwicklung der Prototypen B.0.2.x eingestellt.

Während des Praktikums

Während des Praktikums kann eine passende AR-App den Studierenden durch Hinweise und Tipps sowohl bei der Durchführung des Experiments, als auch bei der Gerätebedienung Hilfestellung geben. Im hier gezeigten Prototyp C.0.1 (siehe Abb. 6.13) kommt die markerloste bzw. merkmalbasierte Augmentierung zum Einsatz, indem verschiedene Bilder des Oszilloskops vom Hersteller *UNI-T* dem SDK als Identifikator übergeben werden. Auf diese Weise können dann Hinweise an den relevanten Stellen des realen Gerätes im Labor eingeblendet werden. Die Interaktion mit der App kann entweder über UI-Elemente auf dem Smartphone-Bildschirm erfolgen oder, wie in diesem Prototyp, mithilfe eines Markers am Finger, der als Interaktionselement fungiert.

Der Prototyp C.0.1 lässt sich nur in Kombination mit realen Laborgeräten nutzen und eignet sich für die Nutzung während des Praktikums oder beim Versuch 0 des E-Labors. Er ist auf die Erkennung von größeren Geräten und eine grobe Merkmalsidentifikation der Trainingsbilder beschränkt. Zustandsänderungen am realen Gerät, wie Verkabelungen oder falsche Einstellungen, lassen sich folglich innerhalb der SDK nicht erfassen. Da den Studierenden nach wie vor der Zugang zu echten Laborgeräten fehlt, ist eine frühzeitige Vorbereitung vor dem eigentlichen Praktikum mit dieser App nicht möglich. Die aus dieser Arbeit hervorgehende Lehrinnovation soll als Vorpraktikum und ohne finanzielle Kosten für Studierende konzipiert werden, weshalb die Weiterentwicklung des Prototypen C vorerst ebenfalls verworfen wird. Im Hinblick auf die

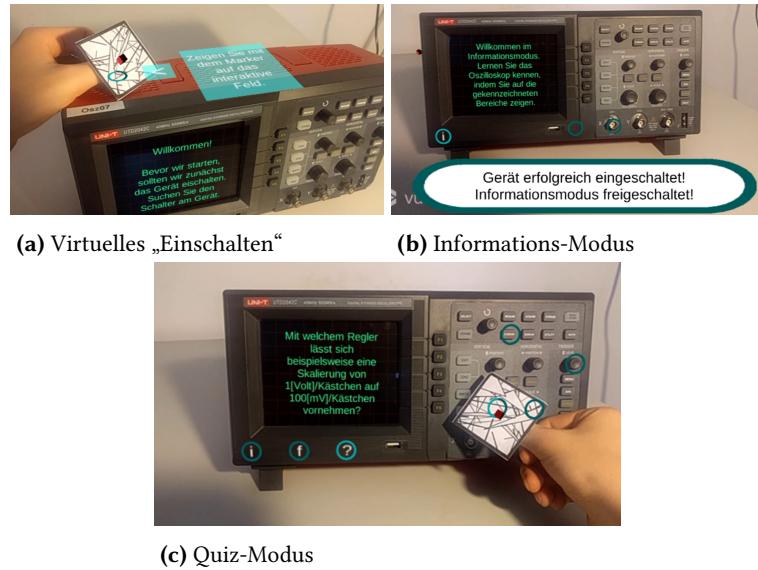


Abbildung 6.13: Augmentierte Echtzeithinweise an einem realen Oszilloskop mit allgemeinen Erklärungen zur Bedienung (6.13 (a)) und Informationen (6.13 (b)) sowie einem kurzen Quiz (6.13 (c)) (Prototyp: C.0.1)

Machbarkeitsstudie stellt dieser Prototyp allerdings eine interaktive und leicht zugängliche Alternative zu herkömmlichen Benutzerhandbüchern dar. Mit ihr könnte der Erklärungs- und Unterstützungsauflwand der Laboringenieur:innen verringert und gleichzeitig das selbstregulierte Lernen im individuellen Tempo der Studierenden gefördert werden.

Die Weiterentwicklung führt die in den Prototypen B.0.1.x und C erprobten Ansätze zusammen. Die merkmalbasierte Augmentierung mit dem Wikitude-SDK (Prototyp C) wird mit der in B.0.1.x realisierten Visualisierung und Interaktion virtueller Laborgeräte verknüpft.

Auf die Planung und Darstellung kompletter Schaltungen (B.0.2.x) wird zunächst verzichtet, da dies die Komplexität deutlich erhöhen und den Fokus auf grundlegende Bedienungskompetenzen von Laborgeräten verwässern würde.

6.5 Zusammenfassung und Reflexion

Zusammenfassung

Die Machbarkeitsstudie untersucht die Entwicklung eines digitalen Oszilloskops und dessen Integration in AR- und VR-Umgebungen für den Einsatz in elektrotechnischen Laborpraktika. Zunächst erfolgt die schrittweise softwaretechnische Abstraktion des Oszilloskops, um eine klare Struktur und Wartbarkeit der Anwendung zu gewährleisten. Damit ist auch die technische Funktionsweise erfasst und in einem UML-Diagramm modelliert, sodass sich die Kernmechanismen eines Oszilloskops abstrahiert implementieren lassen (Forschungsfrage F1). Die Einführung separater Klassen für Visualisierung und Steuerung verringert Redundanzen und erleichtert die Erweiterbarkeit. Durch objektorientierte Prinzipien wie Kapselung³² und Modularität³³ entsteht eine Architektur, die flexibel an neue Anforderungen angepasst werden kann.

Aufbauend hierauf zeigt die Untersuchung, dass der Übergang von einer rein softwarebasierten Simulation zur VR- bzw. AR-Integration sowohl technische als auch konzeptionelle Herausforderungen mit sich bringt. Die anfängliche Umsetzung einer VR-Anwendung mit Google Cardboard (Prototyp A.0.1) erweist sich als unpraktikabel. Begrenzte Interaktionsmöglichkeiten, visuelle Unschärfen und motion sickness führen dazu, dass VR als Entwicklungsrichtung nicht weiterverfolgt wird. Im Gegensatz dazu erweist sich AR als praktikabler Ansatz, sowohl zur Vorbereitung vor als auch während des eigentlichen Laborpraktikums. In der vorbereitenden Phase lassen sich grundlegende Gerätefunktionen (Prototyp B.0.1.x) und einfache Schaltungen (Prototyp B.0.2.x) erlernen. Während des Praktikums lassen sich durch visuelle Overlays am realen Oszilloskop (Prototyp C.0.1) zusätzliche Hinweise, Erklärungen und interaktive Bedienhilfen in Echtzeit einblenden (Forschungsfrage F2).

Während Vuforia eine stabile Darstellung mit Markern ermöglicht, überzeugt Wikitude durch größere Flexibilität bei markerlosen Visualisierungen. Markerbasierte Systeme sind jedoch fehleranfällig, insbesondere bei komplexen Schaltungen oder unzureichender Markererkennung, was ihre praktische Nutzbarkeit einschränkt. Markerlose Ansätze wiederum erfordern eine leistungsfähigere

³² Trennung der internen Implementierung einer Klasse von deren äußeren Zugriffsmöglichkeiten, sodass der direkte Zugriff von außen eingeschränkt oder kontrolliert erfolgt.

³³ Unterteilung eines Systems in kleinere, unabhängige und wiederverwendbare Einheiten (Module), wobei jedes Modul eine klar definierte Aufgabe erfüllt.

Hardware und zeigen bei begrenzten Ressourcen mitunter eine eingeschränkte Stabilität. Zusammen mit der Wahl geeigneter Entwicklungsumgebungen wie Unity3D sowie Werkzeugen zur Versionsverwaltung (Git) und Projektsteuerung (Kanban-Board) kann abgeleitet werden, welche Softwarearchitekturen und Tools sich für die spätere Anwendung als geeignet erweisen (F3).

Die prototypische Umsetzung zeigt damit vielversprechende Ergebnisse, verdeutlicht aber auch Herausforderungen der AR-Technologie. Sie ermöglicht eine anschauliche Visualisierung komplexer Laborgeräte und motiviert gleichzeitig zu aktiver Auseinandersetzung. Zugleich entstehen aber Schwierigkeiten durch technische Limitierungen, Stabilität der Systeme und den hohen Entwicklungsaufwand (F4).

Reflexion und Schlussfolgerung

Mit Blick auf den aktuellen und perspektivisch wachsenden Funktionsumfang erfolgt eine gezielte Neustrukturierung der bestehenden Softwarearchitektur und des EntwicklungswORKFLOWS (Abb. 6.14), um die App modularer und nachhaltiger gestalten zu können (Abb. 6.15).

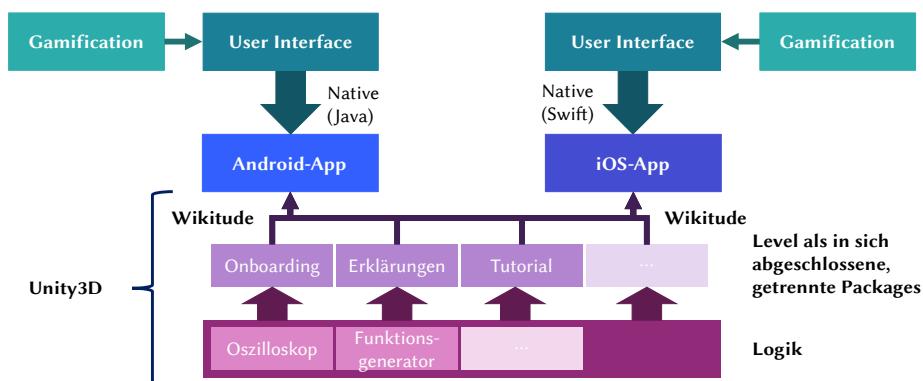


Abbildung 6.14: Modularer Aufbau der App zu Beginn mit der Wikitude-SDK

Ein Rückblick auf die frühere Implementierung der Prototypen verdeutlicht zentrale Entwicklungsentscheidungen: Die App muss zunächst separat für Android und iOS umgesetzt werden, da jede Plattform eine eigene native Anwendung mit spezifischer Benutzeroberfläche erfordert (siehe Abb. 6.14). Dies

geschieht mithilfe der jeweiligen Programmiersprachen (*Java* bzw. *Swift*) und Entwicklungsumgebungen. Parallel entstehen in Unity3D einzelne, geschlossene Pakete (*Packages*), die die Logik der Laborgeräte abbilden und jeweils einen Level in der App (Introduction, Tutorial, Quiz und Sandbox) repräsentieren. Nach ihrer Fertigstellung müssen diese Packages exportiert und separat in die nativen Apps integriert werden.

Diese Vorgehensweise erweist sich im Verlauf der Entwicklung als zunehmend hinderlich, da sie nicht nur tiefgehende Kenntnisse mehrerer Sprachen und Umgebungen erfordert, sondern auch zu einem hohen Aufwand bei Pflege, Anpassung und Weiterentwicklung führt. Selbst kleinere Änderungen müssen wiederholt als Packages exportiert und manuell eingebunden werden, was sich langfristig als ineffizient und fehleranfällig herausstellt.

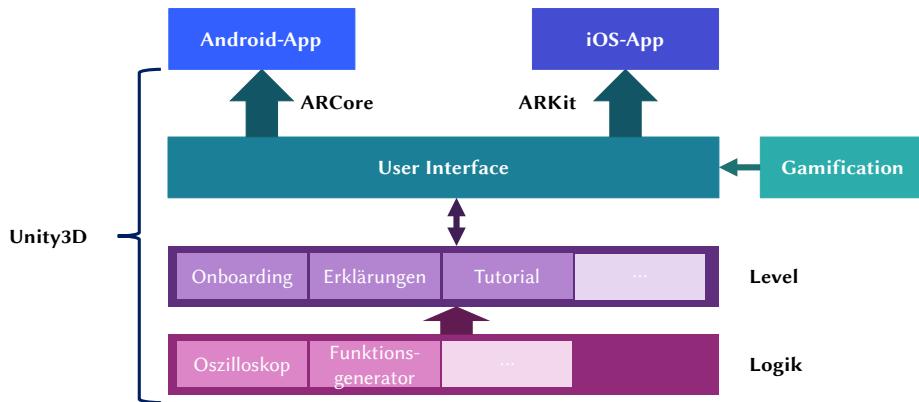


Abbildung 6.15: Umstieg und Weiterentwicklung mit AR Foundation von Unity3D

Als Reaktion auf diese Erfahrungen wird die Architektur grundlegend überarbeitet (siehe Abb. 6.15). Die zuvor getrennten Packages werden nun in ein einheitliches System überführt, das alle Level der App bündelt. Es ermöglicht einen zentralisierten Datenzugriff sowie eine flexible Steuerung über die in Unity3D entwickelte Benutzeroberfläche. Entscheidend ist dabei, dass die gesamte Entwicklung fortan vollständig innerhalb von Unity3D erfolgt, was die Wartung und Erweiterung erheblich erleichtert. Änderungen, beispielsweise am Funktionsumfang der Geräte oder an der Abfolge der Tutorials, müssen nur noch einmal vorgenommen werden und gelten sofort für alle Zielplattformen.

Diese Umstellung erhöht die Modularität deutlich und verbessert dadurch die Flexibilität, Skalierbarkeit und Wartbarkeit der Anwendung. Zusätzlich kommen nun plattformspezifische SDKs wie *ARCore* für Android und *ARKit* für iOS zum

Einsatz, die eine stabilere Performance sowie eine präzisere Verankerung virtueller Objekte ermöglichen. Durch den zentralen Entwicklungsansatz in Unity3D lassen sich zudem aus derselben Codebasis Anwendungen für unterschiedliche Endgeräte erstellen, etwa mittels des *Meta SDK* für die Meta Quest oder des *XR SDK* für die Apple Vision Pro.

Im frühen Stadium entsteht die Anwendung zunächst in einem kleinen Rahmen und wird von einer einzelnen Person entwickelt. Mit dem Ausbau der Funktionalitäten und der Einbindung weiterer Entwickler:innen verändert sich jedoch die Arbeitsweise spürbar. Die zunehmende Komplexität bringt neue Anforderungen an Nachvollziehbarkeit, Transparenz und Abstimmung mit sich. Eine gemeinsame Reflexion der bisherigen Entwicklungspraxis macht deutlich, dass informelle Absprachen und manuelle Dateiverwaltung den steigenden Koordinationsbedarf nicht mehr abdecken. Um diesen Herausforderungen systematisch zu begegnen, wird im weiteren Verlauf das Versionsverwaltungssystem *Git* eingeführt. Diese Entscheidung stellt keine rein technische Maßnahme dar, sondern folgt dem Ziel, die Zusammenarbeit effizienter zu gestalten und eine verlässliche Dokumentation der Entwicklungsschritte zu gewährleisten.

Git erlaubt es, den Entwicklungsprozess strukturiert zu organisieren, indem Änderungen nachvollziehbar dokumentiert werden. Ferner lassen sich frühere Versionen wiederherstellen und parallele Entwicklungsstränge unabhängig von einander bearbeiten [BDW16; Kel24]. Der zentrale Hauptzweig (*main branch*) fungiert dabei als stabile Referenz, in die ausschließlich überprüfte und freigegebene Änderungen einfließen. Neue Funktionen entstehen in separaten *branches*, die unabhängig entwickelt und getestet werden können (vgl. Abb. 6.16).

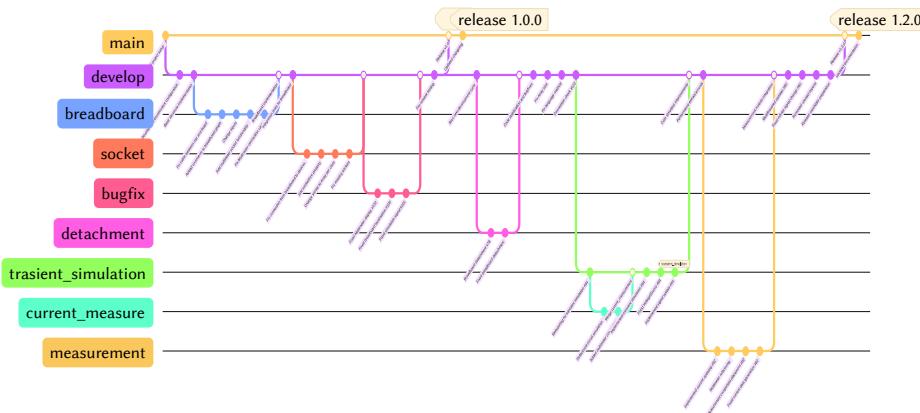


Abbildung 6.16: Das Versionsverwaltungssystem Git für die AR-App mit dem Hauptzweig und den Nebenzweigen, z. B. für bugfixes oder Integration neuer Funktionen wie dem Steckbrett.

Erst nach erfolgreicher Validierung werden diese über einen sogenannten *merge* in den Hauptzweig integriert. Ein Review-Prozess stellt dabei sicher, dass jede Änderung vorab von einem Moderator geprüft und freigegeben wird. Diese Vorgehensweise erhöht die Transparenz und Sicherheit bei der Entwicklung und schafft auch die Voraussetzung für eine effiziente Zusammenarbeit im Team.

Gleichzeitig wird zur weiteren Optimierung und Koordination ein *Git*- bzw. *Issue-Board* genutzt, das nach dem Prinzip eines *Kanban-Boards* arbeitet. Dieses visuelle Werkzeug strukturiert Aufgaben entlang festgelegter Kategorien etwa Priorität oder Prozessschritte (z. B. „To Do“, „In Progress“ und „Done“) (vgl. Abb. 6.17). Auf diese Weise unterstützt es die Aufgabenverteilung und ermöglicht die transparente Nachverfolgung des Fortschritts. Zudem hilft es dabei, potenzielle Engpässe frühzeitig zu erkennen [CP13], die Aufgabenlast sowie -priorisierung in der Übersicht zu überwachen und zu steuern.

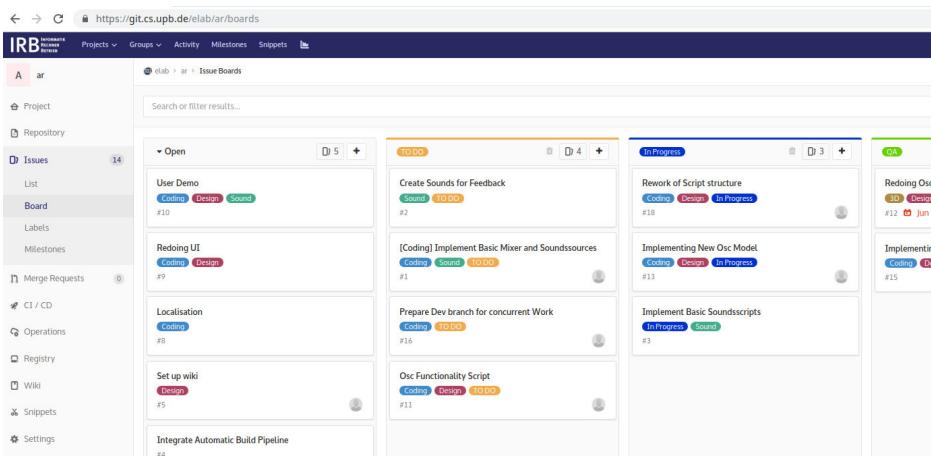


Abbildung 6.17: Das Git-Board für die Strukturierung der Aufgaben und Überwachen des Entwicklungsfortschritts.

Basierend auf den Ergebnissen der Machbarkeitsstudie und den Erkenntnissen der Reflexionsphase wird die Weiterentwicklung mit dem Wikitude-SDK fortgesetzt. Anders als im vorherigen Prototyp, bei dem Hinweise direkt auf reale Laborgeräte projiziert wurden, liegt der Schwerpunkt nun auf einer gezielten Einführung in die Bedienung des Oszilloskops. Die zuvor getroffene Entscheidung für eine spezifische Softwarearchitektur und einen optimierten Entwicklungsworkflow bildet dabei die Grundlage für die Umsetzung eines geeigneten Onboardings im folgenden Kapitel 7.

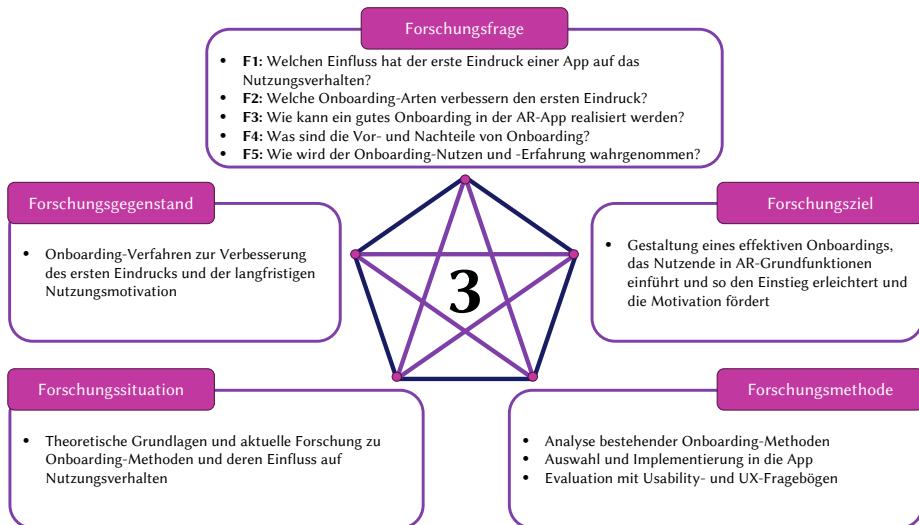


Abbildung 7.1: Research Pentagon zum Onboarding in der App

7.1 Problemstellung, Forschungsfragen und -ziele

Eine fundierte didaktische Grundlage (Kapitel 5) und die gezielte Weiterentwicklung und Konkretisierung der App entlang klar fokussierter Lernziele (Kapitel 6) sind notwendig, aber nicht hinreichend, damit sie langfristig genutzt wird.

Viele Apps werden nach einmaliger Installation nicht weiterverwendet oder direkt gelöscht [Sig+16]. Die Vielzahl an Einflussfaktoren, die dieses Verhalten bestimmen, ist ein eigenständiges Forschungsfeld und wird hier nicht weiter vertieft. Stattdessen konzentriert sich dieses Research Pentagon auf das Onboarding in der App und den damit verbundenen *ersten Eindruck* der Nutzer:innen. Die zentralen Forschungsfragen in diesem Zusammenhang lauten:

- **F1:** Welchen Einfluss hat der erste Eindruck einer App auf das Nutzungsverhalten?
- **F2:** Welche Onboarding-Arten eignen sich, um diesen ersten Eindruck positiv zu gestalten?
- **F3:** Wie lässt sich ein „gutes“ Onboarding in der AR-App realisieren?
- **F4:** Welche Vor- und Nachteile ergeben sich durch den Einsatz von Onboarding?
- **F5:** Wie wird das Onboarding in der aktuellen AR-App wahrgenommen, und welchen Nutzen bietet es?

Das vorrangige Ziel besteht also darin, ein geeignetes Onboarding-Konzept zu entwickeln und umzusetzen, das Nutzer:innen die grundlegenden Funktionen sowie fundamentalen Bedienkonzepte von AR vermittelt und den Einstieg in die App erleichtert.

7.2 Forschungsmethode

Zunächst erfolgt eine detaillierte Analyse wissenschaftlicher und praxisorientierter Onboarding-Arten, um deren Einfluss auf die Erstwahrnehmung zu bewerten. Basierend auf dieser Untersuchung wird ein geeignetes Verfahren ausgewählt und in die App-Version 0.17.01 integriert.

Die Evaluation der App basiert auf dem in Abb. 7.2 dargestellten Forschungsdesign und kombiniert sowohl quantitative als auch qualitative Ansätze.

Mit einer kurzen Einführung in die Studie erhalten die Teilnehmenden anschließend die Möglichkeit, die App in einem Zeitraum von ca. 5 min mit den bereitgestellten Smartphones eigenständig zu testen. Bereits während der Nutzung werden auffällige Verhaltensweisen beobachtet und dokumentiert. Nach der Nutzung beantworten die Teilnehmenden einen strukturierten Fragebogen, der sich in drei Abschnitte gliedert (siehe Kapitel 7.4.1).

Ergänzend zum Fragebogen kann je nach Bedarf³⁴ ein offenes Interview stattfinden, um aufkommende Fragen zu klären oder ein weiterführendes Feedback zu erhalten. Diese qualitative Erhebung ermöglicht eine detailliertere Analyse individueller Nutzungserfahrungen und liefert Kontextinformationen, die über die standardisierten Fragen hinaus wertvolle Erkenntnisse für die Optimierung der App bieten.

³⁴ abhängig von beobachtetem Verhalten oder dem Wunsch der Teilnehmenden

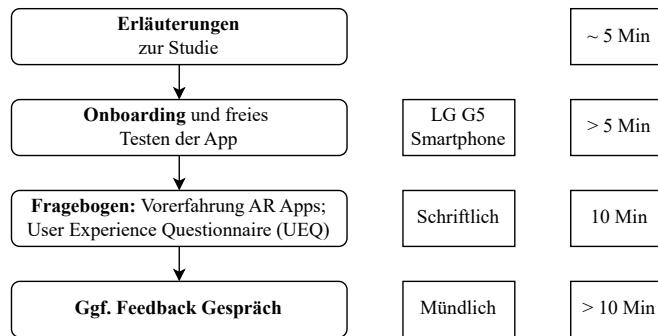


Abbildung 7.2: Forschungsmethode zum Onboarding

Vor der Hauptstudie ist eine Pilotstudie mit acht Studierenden aus der Fachschaft Elektrotechnik durchgeführt worden, um die Verständlichkeit des Fragebogens sowie der Antwortoptionen zu überprüfen und auf Basis dieser Ergebnisse Verbesserungen vorzunehmen. Eine wesentliche Änderung beinhaltet die Einführung in den *User Experience Questionnaire (UEQ)* [Sch18], um die Teilnehmenden auf das unkonventionelle Format des Fragebogens vorzubereiten. Die eigentliche Studie hat im Mai 2019 im Rahmen eines Elektrotechnik-Tutoriums mit Studierenden der Universität Paderborn stattgefunden.

7.3 Forschungssituation: Stand der Forschung zu Onboarding

7.3.1 Definition von Onboarding

Allgemein bezeichnet Onboarding Maßnahmen, die neue Mitarbeiter:innen dabei unterstützen, sich in ein Unternehmen oder eine Organisation einzuarbeiten und schnell zu produktiven Mitgliedern zu werden [Chi20; Hes10]. Im Kontext von Gamification ist ein anderes Verständnis von Onboarding vorherrschend. Hier umfasst es unterstützende Mechanismen, um anfängliche Misserfolge der Spielenden in komplexen Spielsystemen zu minimieren und Demotivation zu verhindern. Darüber hinaus werden Nutzer:innen während des Onboardings in die Hintergrundgeschichte und die Spieler:innen-Rolle eingeführt [ZC11].

Diese Praxis hat sich auch in einer Vielzahl von Web- und mobilen Anwendungen etabliert, einschließlich produktiver und sozialer Medienplattformen sowie zunehmend in Bildungskontexten. Bei digitalen Produkten stellt das Onboarding die erste von insgesamt drei Phasen der Benutzendenunterstützung dar [Ren+14]. Es erfüllt mehrere essenzielle Funktionen, darunter das Einholen notwendiger Genehmigungen für Dienste und Hardware, die Unterstützung bei der Personalisierung und Konfiguration der Anwendung sowie die Bereitstellung von Orientierungshilfen bei der erstmaligen Nutzung. Für die vorliegende Arbeit wird die Definition nach [Ren+14] herangezogen, die Onboarding als Gesamtheit der Elemente und Techniken beschreibt, die dazu dienen, neuen Anwender:innen den Umgang mit einem Produkt zu erleichtern, sodass sie es (effizienter) nutzen können. Ähnliche Definitionen finden sich auch in anderen wissenschaftlichen Arbeiten und bei UI-Expert:innen, beispielsweise in [Hes10]:

„Onboarding is the process by which you can help users overcome the cold-start problem – a blank profile, an unfamiliar interface [...]“
[Hes10].

Zusätzlich existieren in der Literatur und in Entwicklungsumgebungen verschiedene Begriffe für Onboarding, darunter „new user experience“ oder „first use experience“ [MD14], „(Inline-)Tutorial“ [Ren+14] und „(initial) Walkthrough“ [Sat14].

7.3.2 Bedeutung des ersten Eindrucks und des Onboardings

In vielen Forschungsbereichen spielt die Bildung des ersten Eindrucks eine zentrale Rolle (z. B. [Tuc+12]). Forschende untersuchen, wie dieser im Einzelnen entsteht und welche Faktoren ihn beeinflussen. Studien aus der Emotionsforschung zeigen, dass sich der erste Eindruck zwischen Menschen innerhalb von nur 39 ms bildet, zeitlich persistent ist und einen erheblichen Einfluss auf das Vertrauen, die Attraktivität und die Leistungsbewertung des Gegenübers hat [BNL06; RS99]. Besonders in der Software- und Webseitenentwicklung ist der erste Eindruck von entscheidender Bedeutung [Tuc+12]. Durchschnittlich verweilen Nutzer:innen nur drei Sekunden auf einer Webseite, wenn sie nicht die gewünschten Informationen finden [Lin+06; Tuc+12]. Ein vergleichbares Verhalten tritt auch bei mobilen Apps auf. In einer großangelegten Studie von Böhmer et al. (2011) ist das Nutzungsverhalten von 4.100 Android-Nutzer:innen untersucht worden [Böh+11]. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die durchschnittliche

Interaktionsdauer mit einer App unter einer Minute liegt, wobei in etwa 50 % der Fälle die Nutzung bereits nach fünf Sekunden beendet wird. Ähnliche Befunde finden sich auch in anderen Studien etwa [MD14]. Sie belegen, dass visuelle Reize schnell wahrgenommen und unmittelbar bewertet werden, um ihre persönliche Relevanz einzuschätzen.

Die Gestaltung eines ansprechenden UIs stellt im Kontext mobiler Apps eine besondere Herausforderung dar. Aufgrund der begrenzten Displaygröße steht weniger Raum für die Darstellung von Inhalten zur Verfügung [MD14]. Zudem erfolgt die Interaktion über die Fingersteuerung, die ungenauer und fehleranfälliger ist als die Maussteuerung am Computer. Dies erfordert größere Interaktionselemente und eine optimierte Benutzendenführung, da viele Inhalte erst bei richtiger Menüwahl in den Vordergrund rücken. Um den Nutzer:innen dennoch die vielen Vorteile und Funktionen einer App zu präsentieren, wird auf das Onboarding zurückgegriffen, das i. d. R. beim initialen Start einer App erscheint.

,The first few minutes that a user installs and launches the app can determine whether they will be repeat users or if they'll immediately uninstall and keep searching the app store for something else.“ [Ech14].

,With 26 % of users deleting an app after first use, the first time use scenario is your only opportunity to give them a reason to return.“ [Sai13].

Folglich ist das Onboarding ein wichtiger Einflussfaktor für den ersten Eindruck und die erste Nutzendenerfahrung von (mobilen) Anwendungen.

7.3.3 Arten von Onboarding

Das Interesse am Onboarding ist insbesondere unter Entwickler:innen und Designer:innen groß, weshalb sich Empfehlungen zur Gestaltung vorrangig in diesen Fachkreisen und weniger in der wissenschaftlichen Literatur finden lassen [SGV18]. Es existiert daher kein einheitlicher Konsens über die optimale Klassifikation von Onboarding-Prozessen, und die vorgeschlagenen Arten sind oft nicht klar abgegrenzt. Dennoch lassen sich in den meisten Orientierungshilfen mindestens drei Hauptformen des Onboardings identifizieren: das nutzenorientierte, das funktionsorientierte und das progressive Onboarding (vgl. z. B. [Hes10], [Cha19] oder [Str22]). Diese werden im Folgenden detailliert erläutert.

Nutzenorientiertes Onboarding

Beim nutzenorientierten Onboarding (engl. *benefit-oriented onboarding*) steht die Vermittlung des Mehrwerts einer Anwendung für die Nutzer:innen im Mittelpunkt. Es beantwortet die Frage, welchen konkreten Nutzen die App bietet und wie Anwender:innen davon profitieren können [Por].

„People don't care what your app does. They only care about what it can do for them.“ [Str22]

Um eine kognitive Überlastung zu vermeiden, sollten im Onboarding maximal drei zentrale Vorteile präsentiert werden. Die Darstellung folgt der „one slide, one concept“-Regel: Nach einer Priorisierung der wichtigsten Vorteile wird pro Seite jeweils nur ein Hauptnutzen visualisiert (vgl. Abb. 7.3)[Sat14]. Dabei ist eine knappe und prägnante Formulierung entscheidend, um die Inhalte leicht verständlich und schnell erfassbar zu gestalten. Zudem sollte das Onboarding vor der Anmeldung oder dem Login erfolgen. Dadurch erhalten Nutzer:innen bereits vorab einen Einblick in die Vorteile der App und die damit verbundenen Dienste.

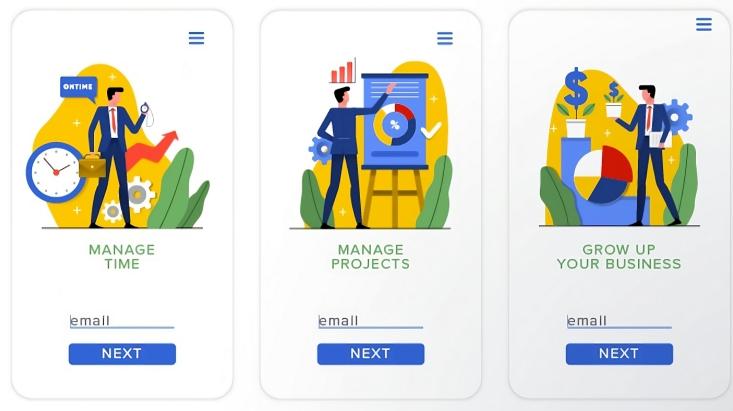


Abbildung 7.3: Beispiel für ein nutzenorientiertes Onboarding. Quelle: [Cha19]

Funktionsorientiertes Onboarding

Beim funktionsorientierten Onboarding (engl. *function-oriented onboarding*) hingegen stehen – wie der Name bereits andeutet – die zentralen Funktionen

der App im Vordergrund. Häufig findet es im leeren Zustand (engl. *empty state*) Einsatz, wenn die Anwendung nach der Installation noch keine Inhalte enthält, etwa eine leere Aufgabenliste. Hierbei sollten ausschließlich die wichtigsten Funktionen erläutert werden, etwa die zentralen Interaktionsgesten, die für eine effiziente Nutzung der App erforderlich sind. Die Erklärungen beinhalten, wo sich diese Funktionen befinden und mit welcher Geste sie verwendet werden können. Auf die Beschreibung allgemein bekannter UI-Elemente, wie das Stift-Piktogramm für Bearbeitungen oder den Teilen-Button, kann verzichtet werden. Generell sollte sich das Onboarding an gängigen UI-Mustern (engl. *UI Pattern*) orientieren, die in den Design-Richtlinien (engl. *Design Guides*) von Google³⁵ und Apple³⁶ sowie von UI- und UX³⁷-Expert:innen vorgeschlagen werden. Da viele Anwendungen ähnliche Muster nutzen, reduziert sich die Einarbeitungszeit für Nutzer:innen erheblich. Auch hier folgt die Gestaltung der „one slide, one concept“-Regel mit maximal drei zu erklärenden Funktionen [Sat14]. Abb. 7.4 veranschaulicht dies am Beispiel der Kamera-App *Halide Mark II*³⁸.

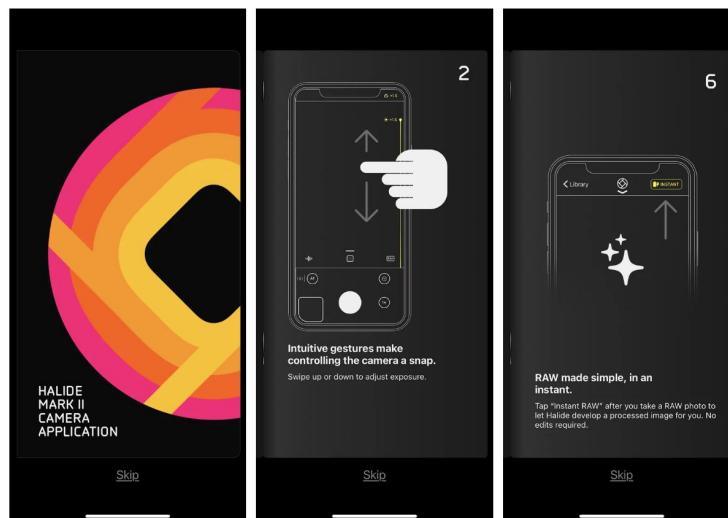


Abbildung 7.4: Beispiel für ein funktionsorientiertes Onboarding. Quelle: [Str22]

35 <https://developer.android.com/design>

36 <https://developer.apple.com/design/human-interface-guidelines/designing-for-ios>

37 *User Experience (UX)*

38 <https://halide.cam>

Progressive Onboarding

Besonders im Bereich digitaler Spiele kommt das progressive Onboarding (*progressive onboarding*) häufig zum Einsatz. Es basiert auf der Annahme, dass Menschen neue Funktionen am besten erlernen, indem sie aktiv damit interagieren [Ech14; Sat14].

Typischerweise erfolgt die Einführung als interaktives Tutorial, bei dem Nutzer:innen schrittweise bestimmte Aktionen ausführen. Die Anweisungen geben genau an, *was* mit *welcher* Geste *wo* erreicht werden kann. Diese Methode eignet sich besonders für Anwendungen mit komplexen Workflows oder gestenbasierter Steuerung (vgl. Abb. 7.5).

Im leeren Zustand stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung: Entweder erhalten Nutzer:innen Beispieldaten, mit denen erste Instruktionen ausprobiert werden können, oder das System generiert durch die durchgeführten Aktionen eigene Beispielinhalte. Diese Methode erleichtert die Einarbeitung und schafft eine strukturierte Einführung und Orientierung in die Anwendung [Ech14].

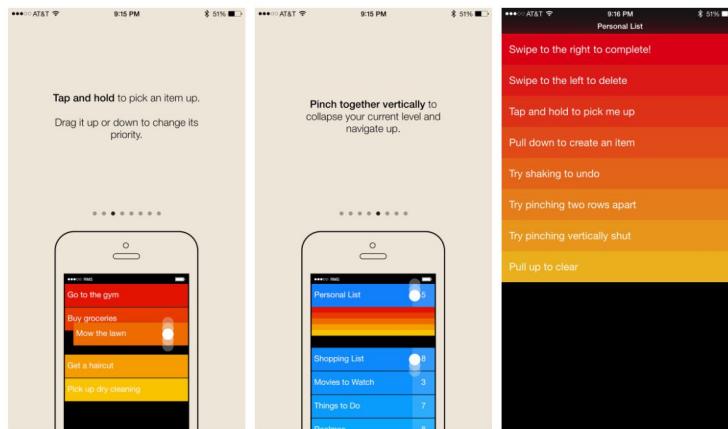


Abbildung 7.5: Beispiel für ein progressives Onboarding im empty state mit Beispielinhalten in der App *Clear Lists*. Quelle: [Ben15]

Auch hier empfiehlt es sich, das Onboarding möglichst kompakt zu halten. Statt jede einzelne Aktion aufzudrängen, sollte Nutzer:innen größtmöglicher Freiraum gelassen werden, um die App individuell zu erkunden und sich mit ihr vertraut zu machen. Offensichtliche Funktionen bedürfen keiner expliziten Erläuterung. Stattdessen sollten sich Entwickler:innen auf die Gestaltung von Anleitungen konzentrieren, unter der Annahme, dass bekannte Gestaltungsmuster aus anderen Anwendungen bereits vertraut sind.

Aufgrund der hohen Komplexität der virtuellen Laborgeräte und der ungewöhnlichen Interaktionsart in AR-Anwendungen kombiniert diese Arbeit funktionsorientiertes und progressives Onboarding. Letzteres ist dabei als interaktives Tutorial gestaltet, das jederzeit im Hauptmenü abrufbar bleibt. Diese Kombination soll den Einstieg erleichtern und eine effiziente Nutzung der Laborgeräte in der Anwendung unterstützen.

7.3.4 Vor- und Nachteile von Onboarding

Der Einsatz von Onboarding und App-Anleitungen ist jedoch sowohl in der Forschung als auch in der Praxis umstritten [Joy+16]. Ein zentraler Kritikpunkt besteht darin, dass eine App intuitiv bedienbar sein sollte und eine (Bedienungs-) Anleitung diesem Paradigma widerspricht (z. B. [Ech14] und [Joy+16]). Zudem empfinden viele Nutzer:innen App-Unterstützung als zeitintensiv [Ech14] oder störend [ILM09].

Untersuchungen zum Lernverhalten auf Touchscreens zeigen, dass ein erheblicher Teil der Nutzer:innen (44,4 %) Onboarding-Anleitungen ignoriert und stattdessen direkt mit der App interagiert. Die Mehrheit (65,7 %) bevorzugt es, Funktionen eigenständig durch Ausprobieren zu erschließen [TW13]. Dies liegt daran, dass das Hauptinteresse weniger auf systemischen Aspekten der App als vielmehr auf der schnellen Erledigung einer spezifischen Aufgabe liegt, für die die App installiert wird [TW13]. Andere Studien betonen hingegen, dass Benutzendenunterstützung in bestimmten Situationen unverzichtbar ist (z. B. [Sat14] und [Har14]); aufgrund der begrenzten Bildschirmgröße mobiler Endgeräte müssen viele Informationen im Hintergrund gehalten werden, die nur durch spezifische Gesten oder Interaktionen abrufbar sind [TW13]. Mit zunehmender Funktionalität einer App steigt ihre Bedienkomplexität, was die Notwendigkeit gezielter Unterstützung verstärkt [ILM09]. Die aktive Hilfe wird besonders relevant – so die Studien – da Nutzer:innen selten proaktiv nach Hilfestellungen suchen [ILM09] oder kaum Dokumentationen konsultieren [NW06]. Dies führt in Folge oft zu Frustration oder zur Deinstallation der App [ILM09].

Studien zu mobilen Anwendungen zeigen, dass Usability-Probleme hauptsächlich für das Löschen einer App sind [Ber+06; Ino+13]. Weitere Ursachen sind die Diskrepanz zwischen den Erwartungen der Nutzer:innen und den tatsächlichen Funktionen sowie Schwierigkeiten bei der Bedienung [ILM09; Ino+13]. Diese Faktoren verdeutlichen die Erwartung an eine gewisse Form der Unterstützung innerhalb der App.

Die Wahrnehmung von Benutzendenunterstützung hängt maßgeblich von der Präsentationsform³⁹, der Aufgabenkomplexität und der aktuellen Tätigkeit ab [Ber+06]. Während dringend benötigte Informationen als hilfreich empfunden werden, gelten weniger relevante Hinweise schnell als störend. Gleichzeitig trägt ein schneller und effizienter Einstieg in ein neues System positiv zur Nutzenden erfahrung bei [PRS15].

Trotz der bestehenden Debatte sprechen mehrere Gründe für den Einsatz von Onboarding in dieser Arbeit. Hess (2010) identifiziert vier Szenarien, in denen Onboarding entweder notwendig oder vorteilhaft ist [Hes10]:

1. beim *Empty* oder *Blank State*, wenn die App zu Beginn keine Inhalte enthält
2. wenn persönliche Informationen wie Alter, Geschlecht oder Gewicht erforderlich sind
3. wenn die App Teil eines umfangreicher Softwarepaket ist
4. bei der Implementierung neuer oder unkonventioneller Interaktionsschemata

Zwei dieser Szenarien treffen auf die AR-Anwendung zu: Erstens startet die App im *empty state*, da zu Beginn weder Inhalte noch ein sichtbares Laborgerät vorhanden sind. Stattdessen sehen die Nutzer:innen lediglich ein Menü, aus dem sie ein gewünschtes Level starten können. Zweitens unterscheidet sich die Interaktion mit virtuellen Objekten in AR von klassischen Bedienkonzepten. Gesten wie *Pinch-to-Zoom*⁴⁰ sind nicht anwendbar, da die Objekte im realen Raum verankert sind. Eine Vergrößerung erfolgt daher durch physische Annäherung an das Objekt.

Zusätzlich erschwert die hohe Detailgenauigkeit der virtuellen Laborgeräte den Einstieg. Die Vielzahl an Knöpfen und Bedienelementen kann kognitiv überfordern, insbesondere wenn Nutzer:innen parallel andere Aufgaben bewältigen müssen, wie die korrekte Ausrichtung des Smartphones oder die Navigation in der AR-Umgebung. Diese spezielle mentale Belastung in AR-basierten Lernanwendungen ist in der Forschung gut dokumentiert und wird als häufige Herausforderung beschrieben (z. B. [Wu+13] und [DDM09]).

³⁹ Hilfe anbieten (*push support*) vs. Hilfe anfordern (*pull support*)

⁴⁰ bei mobilen Endgeräten etablierte Geste, bei der zwei Finger auf dem Bildschirm zusammen- oder auseinandergezogen werden, um Inhalte zu verkleinern oder zu vergrößern

Ein gezielt eingesetztes Onboarding kann dieser anfänglichen Überforderung entgegenwirken, indem es die Aufmerksamkeit auf wenige, essenzielle Informationen lenkt. Bei einer geeigneten Gestaltung unterstützt es nicht nur das Verständnis für die AR-Anwendung, sondern vermittelt gleichzeitig auch grundlegende Kenntnisse im Umgang mit den Laborgeräten selbst.

7.4 Forschungsgegenstand: Entwicklung und Auswertung des Onboardings in der AR-App

7.4.1 Verwendete Materialien

Messinstrument: Fragebogen

Es existieren zahlreiche standardisierte Fragebögen zur Bewertung der Benutzeroberfläche und Nutzenderfahrung von Softwareprodukten [SL16]. Diese dienen dazu, subjektive Eindrücke der Anwender:innen zu sammeln und Schwachstellen aufzudecken. Zu den etablierten Instrumenten zählen unter anderem *AttrakDiff*⁴¹, *UEQ*, *ISONORM 9241-110-S*⁴², *QUIS*⁴³, *SUMI*⁴⁴, *SUS*⁴⁵ und *WAMMI*⁴⁶.

Der *UEQ* hat sich aufgrund seiner weiten Verbreitung und schnellen Durchführbarkeit als besonders nützlich erwiesen. Dieser Fragebogen ist um zwei Abschnitte erweitert worden (vgl. Anhang S. XXVI): Der erste Abschnitt erfasst demografische Daten sowie die Vorerfahrung mit Smartphones im Allgemeinen und AR-Anwendungen im Speziellen, um Unterschiede in der Nutzung abhängig von technischen Vorkenntnissen berücksichtigen zu können. Danach folgt ein Abschnitt mit teils offenen Fragen zum Onboarding, in dem die Teilnehmenden in Freitextform ihre subjektiven Eindrücke zur Verständlichkeit und Nutzenderführung der App schildern können. Hier liegt der Fokus auf dem wahrgenommenen Mehrwert des Onboardings sowie auf möglichen Defiziten und Verbesserungsvorschlägen für die Weiterentwicklung.

⁴¹ Attraktivität Differenzial [HKB08]

⁴² International Organization for Standardization Norm 9241-110-S [WKS09]

⁴³ Questionnaire for User Interaction Satisfaction [CDN88]

⁴⁴ Software Usability Measurement Inventory [Kir96]

⁴⁵ System Usability Score [BKM08]

⁴⁶ Website Analysis and MeasureMent Inventory: [KC98]

Abschließend kommt der UEQ zum Einsatz, der 26 Items mit je einem Gegen- satzpaar umfasst. Die Paare beschreiben jeweils zwei gegensätzliche Eigenschaften, aus denen die Befragten das zutreffendere Adjektiv bestimmen müssen. Die Bewertung dieser Paare basiert auf einer 7-stufigen Likert-Skala und dient als Grundlage für die spätere Transformation in eine Skala von -3 bis +3. Die Items 3, 4, 5, 9, 10, 12, 17, 18, 19, 21, 23, 24 und 25 müssen für eine korrekte Berechnung umkodiert werden, da die positiven Adjektive links, die negativen rechts auf der Skala angeordnet sind. Für die weitere Analyse lassen sich die Items in sechs Dimensionen unterteilen, wie in Abb. 7.6 dargestellt.

Die Skalen lassen sich nach dem UEQ-Handbuch wie folgt definieren [Sch18]:

- **Attraktivität:** Bewertet den Gesamteindruck der Software
- **Effizienz:** Beurteilt, wie schnell und mit welchem Aufwand Nutzer:innen ihre Ziele mit der Software erreichen
- **Durchschaubarkeit:** Misst die Einfachheit und Schnelligkeit, mit der Nutzer:innen die Software verstehen und nutzen können
- **Steuerbarkeit:** Bewertet die Kontrollierbarkeit und Vorhersagbarkeit der Interaktion mit der Software
- **Stimulation:** Misst das Potenzial der Software, Nutzer:innen zu motivieren und zu fesseln
- **Originalität:** Beurteilt den Innovationsgrad und die Kreativität der Software

Die Skalen Effizienz, Steuerbarkeit und Durchschaubarkeit bilden pragmatische Qualitätsaspekte, während Stimulation und Originalität hedonische Qualitäten darstellen. Die Attraktivität kombiniert beide Qualitätsarten [Sch18] (siehe Abb. 7.6).

Smartphones und App-Version 0.17.01

Um eine Vergleichbarkeit der Studienergebnisse sicherzustellen und gerätespe- zifische Einflüsse wie unterschiedliche Displayqualität, Prozessorleistung oder Betriebssystemversion auszuschließen, stehen zwei identische Smartphones (LG G5) mit der Android-Version 7.0 (*Nougat*) zur Verfügung. Das LG G5, das im April 2016 eingeführt wurde, zählt zum Zeitpunkt der Studiendurchführung zur Mittel- klasse von Smartphones, was sich aus dem Update-Zyklus für Android-Versionen ergibt [Dev18].

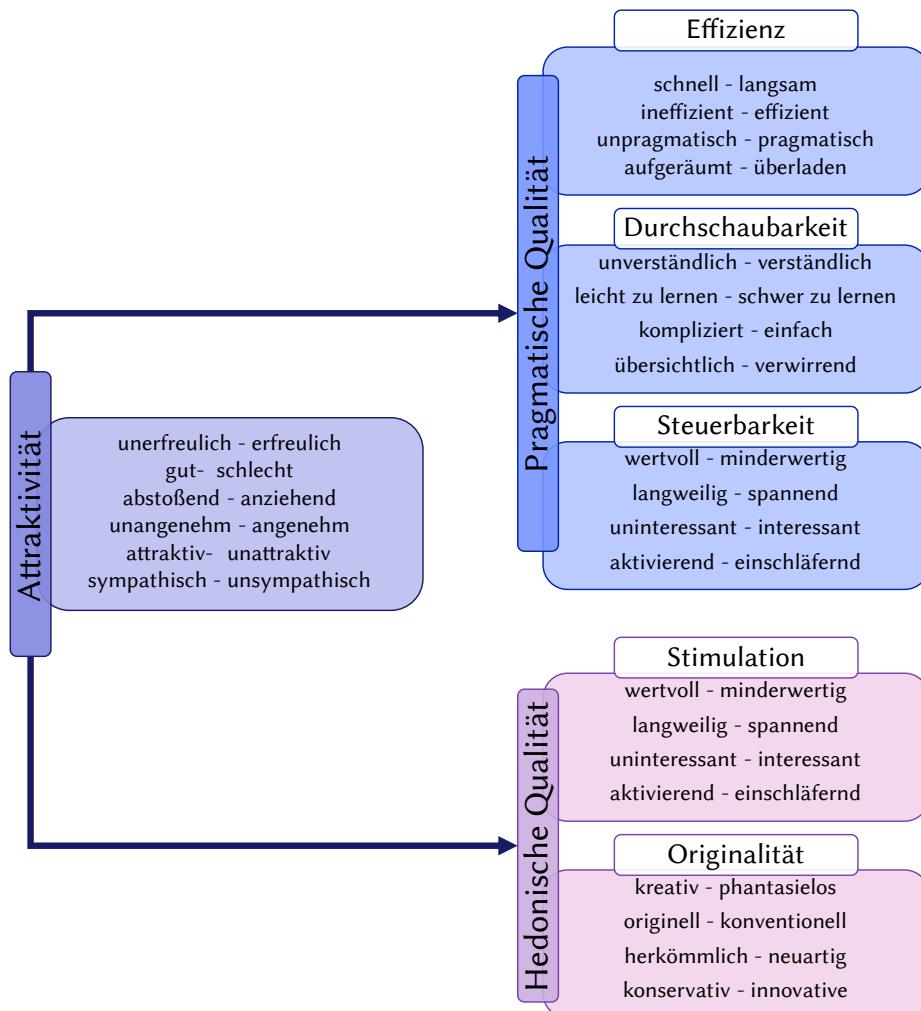
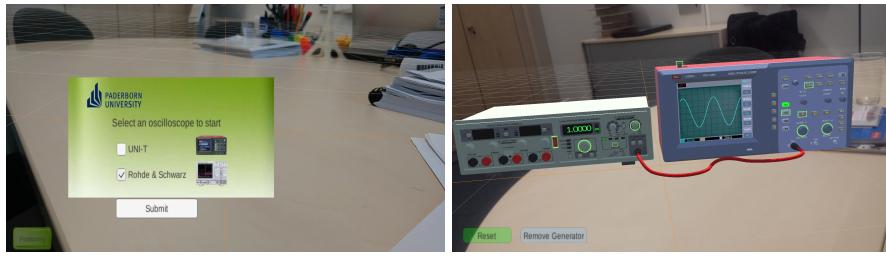


Abbildung 7.6: Organisation der 26 Items, 6 Skalen und 3 Qualitätsaspekte des UEQ.
Eigene Darstellung nach [Sch18]

Die App in der Version 0.17.01 enthält zwei Oszilloskop-Modelle der Hersteller Rhode & Schwarz und UNi-T, sowie einen Funktionsgenerator von Rhode & Schwarz (siehe Abb. 7.7 (a)). Die logische Funktionalität dieser Geräte ist bereits in den jeweiligen virtuellen Modellen implementiert (siehe Abb. 7.7 (b)).



(a) Verfügbare Geräte in der App-Version 0.17.01 (b) Verbindung des virtuellen Funktionsgenerators mit dem Oszilloskop

Abbildung 7.7: Version 0.17.01 der App, die für die Onboarding-Studie genutzt wird, mit den verfügbaren Geräten (7.7 (a)) und Ausschnitt aus dem Onboarding-Prozess (7.7 (b))

Die Bedienung der virtuellen Geräte folgt einer logischen Abfolge, die sich an realen Laborgeräten orientiert. Bestimmte Funktionen werden erst zugänglich, sobald alle erforderlichen Voraussetzungen erfüllt sind. Beispielsweise lässt sich der „COURSE“-Regler des Oszilloskops erst bedienen, wenn zuvor die Messfunktion aktiviert ist. Nach der Aktivierung eines Kanals können Nutzer:innen die Empfindlichkeit oder Zeitbasis des dargestellten Signals mithilfe der entsprechenden Drehregler anpassen. Damit verhält sich jedes virtuelle Gerät mit den bisher implementierten Funktionen analog zu seinem realen Gegenstück. Dies trägt einerseits zu einem authentischen Bedienungslebnis bei, erhöht jedoch auch die Komplexität der Anwendung.

7.4.2 Entwicklung: Implementierung des progressiven Onboardings

Die App ist so angepasst, dass sie ausschließlich aus dem Onboarding besteht, welches als schrittweises Tutorial umgesetzt und im Ablaufdiagramm in Abb. 7.8 veranschaulicht wird. Denn – wie eingangs erläutert – liegt der Fokus dieses Research Pentagons auf einem positiven ersten Eindruck und einem gelungenen Einstieg durch das Onboarding. Des Weiteren sind in der vorliegenden Version weder zusätzliche Funktionen noch ein erweitertes Menü integriert.

Folglich besteht der leere Zustand wieder aus dem Startmenü im Onboarding-Prozess, bei dem die Nutzer:innen aufgefordert werden ein Oszilloskopmodell auszuwählen (siehe Abb. 7.9). Dieses Startmenü dient sowohl als Ausgangspunkt

für das Onboarding als auch als leerer Zustand der Anwendung. Der Aufbau des Onboardings im Ablaufdiagramm mag auf den ersten Blick unnötig komplex erscheinen, ermöglicht jedoch durch die modulare Struktur und die Abkapselung einzelner Bereiche eine flexible und effiziente Erweiterung der App in späteren Entwicklungsphasen (vgl. Abb. 7.13 im Reflexionskapitel 7.5.2).

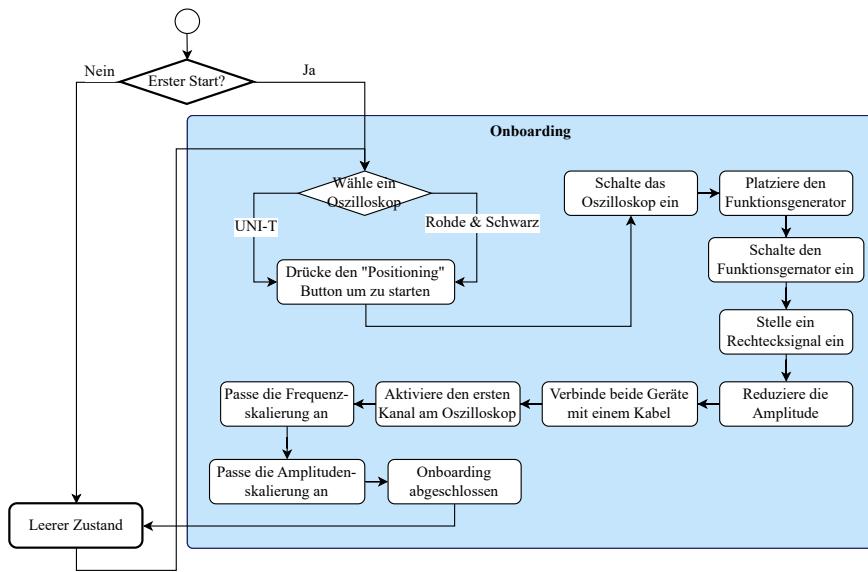
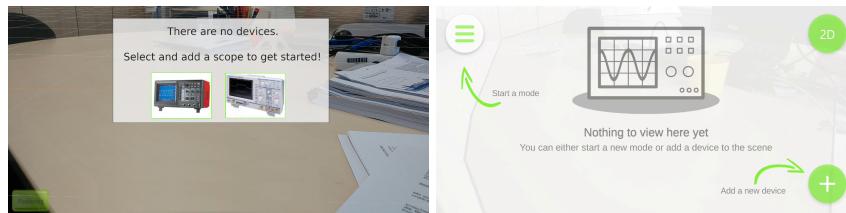


Abbildung 7.8: Ablaufdiagramm zum Onboarding in der App-Version 0.17.01

Nach Auswahl eines Oszilloskops projiziert das System ein Gitter in die Umgebung in der aktivierten Kameraansicht, um eine Platzierungsfläche für virtuelle Objekte zu schaffen. Diese Funktion basiert auf dem Wikitude-SDK, dessen kostenlose Version jedoch eingeschränkte Tracking-Funktionen bietet. Dadurch werden die Geräte in manchen Fällen nicht auf einer stabilen Fläche, sondern scheinbar schwebend in den Raum gesetzt.

Mit dem erscheinenden „Positioning“-Button lässt sich das zuvor ausgewählte Oszilloskopmodell auf dem Gitter platzieren. Nach Einschalten des Oszilloskops muss der Funktionsgenerator hinzugefügt und ein Rechteckssignal mit einer Amplitude von 0,5 V eingestellt werden. Durch das Verbinden des Ausgangs des Funktionsgenerators mit dem Eingangskanal des Oszilloskops sowie das Aktivieren von Kanal 1 (CH1) erscheint das Signal auf dem Display des virtuellen Oszilloskops. Anschließend folgen Instruktionen zu den zentralen Reglern eines

Oszilloskops, darunter die Einstellung der Zeitbasis für die horizontale Skalierung und der Empfindlichkeit für die vertikale Skalierung.



(a) Leerer Zustand in der App-Version 0.17.01 für Android (b) Leerer Zustand in der erweiterten App-Version 0.17.07 für mobile Endgeräte

Abbildung 7.9: Leerer Zustand in der AR-App mit einem Hinweistext und einer Auswahlmöglichkeit der verfügbaren Oszilloskopmodelle (7.9 (a)) und der verfügbaren App-Funktionen (7.9 (b)) in der späteren Version.

Um neuen Nutzer:innen den Einstieg zu erleichtern, setzt das Onboarding auf eine visuelle Führung, bei der nur relevante Bedienelemente des Oszilloskops hervorgehoben werden. Weniger wichtige Funktionen, wie das Trigger-Menü, bleiben deaktiviert. Der Bildschirm ist ausgegraut, während wichtige Schaltflächen beleuchtet und durch Pfeile markiert sind – eine Technik, die häufig in interaktiven Lernanwendungen oder Spielen verwendet wird. Diese schrittweise Fokussierung stellt sicher, dass die Aufmerksamkeit gezielt auf zentrale Funktionen gelenkt wird, was die Einarbeitung in die Arbeitsabläufe der Laborgeräte erleichtert. Gleichzeitig reduziert sie eine kognitive Überlastung durch die realistische 3D-Darstellung des Oszilloskops mit seinen vielen Bedienelementen (siehe Abb. 7.10).

Die Instruktionen im Tutorial orientieren sich an den in der Literatur und Praxis empfohlenen Prinzipien der Klarheit und Prägnanz, wie z. B. von Portman und Hess (2010) beschrieben [Hes10; Por]. Dabei liegt der Fokus auf einer konsistenten, direkten und verständlichen Ausdrucksweise. Jeder Schritt der Anleitung vermittelt das „Was“, „Wie“ und „Warum“ einer Aktion, beispielsweise: „Halte und drehe den Finger (wie), um die Signalamplitude (was) auf 0,5 V zu reduzieren (warum).“ (siehe Abb. 7.10).

Gemäß der Selbstbestimmungstheorie von Deci und Ryan (2000) [DR00] sollten Nutzer:innen in jeder Phase die Kontrolle über die App erhalten. Daher sollte das Onboarding optional sein und jederzeit übersprungen oder beendet werden können, auch wenn es für das Verständnis der Anwendung essenziell ist [Ech14].

Da in der aktuellen Version V0.17.0.1 noch keine konkreten Aufgaben mit den Geräten vorgesehen sind, bleibt das Onboarding jedoch verpflichtend.

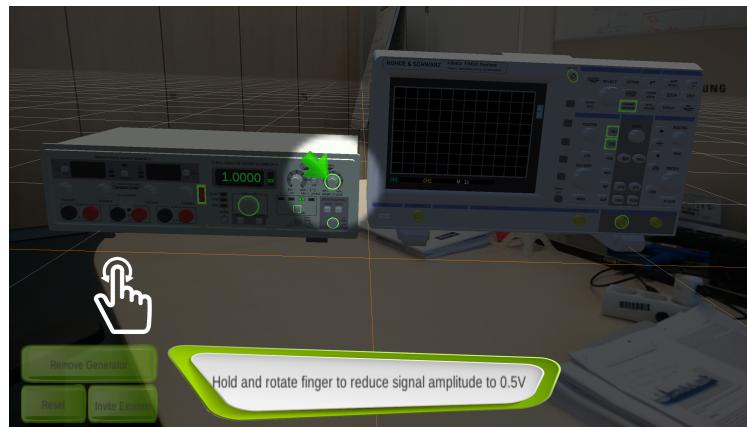


Abbildung 7.10: Schritt-für-Schritt-Anleitung mit Fokus auf jeweils einer Handlung.

7.4.3 Teilnehmende der Studie

An der Umfrage im Dezember 2018 beteiligten sich insgesamt 44 Studierende, darunter 36 männliche. Aufgrund unvollständiger oder inkonsistenter Antworten können nur 41 Proband:innen für den ersten und 39 für den zweiten Abschnitt des Fragebogens herangezogen werden (vgl. Tabelle 7.1).

Tabelle 7.1: Geschlechterverteilung sowie Vorerfahrung mit AR-Apps

Geschlecht		AR Vorerfahrung	
m	w	Ja	Nein
33	8	18	23
41		41	

Etwa 70 % der Teilnehmenden sind Bachelor-Studierende aus den Fachbereichen Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen mit dem Schwerpunkt Maschinenbau (vgl. Tab. 7.2). Die durchschnittliche Nutzungsdauer von Smartphones oder Tablets unter den Befragten liegt bei 6,9 Jahren, mit einer Standardabweichung von 2,7 Jahren.

Eine Mehrheit von 88 % der Studierenden nutzt ihr Smartphone häufig oder sehr häufig (Tab. 7.2), hauptsächlich für Kommunikation (92 %), Organisation (73 %) und Unterhaltung (80 %). Trotz dieser regelmäßigen Nutzung und Er-

Tabelle 7.2: Häufigkeitsverteilung nach Studiengang und Smartphone-Nutzung. CIW = Chemieingenieurwesen; ET = Elektrotechnik; MB = Maschinenbau; Wing MB = Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau.

Studiengang	Häufigkeit	Smartphone Nutzung	Häufigkeit
CIW	1	Sehr selten	1
ET	8	Eher selten	0
MB	17	Teils teils	4
Technomathematik	3	Eher häufig	8
Wing MB	12	Sehr häufig	28
Gesamt	41	Gesamt	41

fahrung mit Smartphones sind AR-Anwendungen weniger als der Hälfte der Studierenden (44 %) bekannt (Tab. 7.1).

7.4.4 Ergebnisse zum UI und UX

Reliabilitätsanalyse

Die Analyse der verbleibenden 39 Studierenden ergibt anhand des *Cronbachs-Alpha-Koeffizient* hohe Werte interner Konsistenz für die Skalen Attraktivität ($\alpha = 0,89$), Durchschaubarkeit ($\alpha = 0,84$), Stimulation ($\alpha = 0,89$) und Originalität ($\alpha = 0,79$). Dagegen fallen die Werte für Effizienz ($\alpha = 0,63$) und Steuerbarkeit ($\alpha = 0,55$) niedriger aus, was vermutlich auf Missverständnisse bei einzelnen Items zurückzuführen ist. Laut dem UEQ-Handbuch beeinflussen mehrere Faktoren die Reliabilitätswerte. Eine geringe Stichprobengröße mit 39 Teilnehmenden kann ebenso eine Rolle spielen wie die eingeschränkte Anwendbarkeit bestimmter Items auf das getestete Produkt. Begriffe wie „sympathisch“ oder „freundlich“ passen möglicherweise nicht in den spezifischen Nutzungs-kontext. Auch kontextabhängige Interpretationen führen zu Abweichungen, etwa wenn „Sicherheit“ als Datenschutz oder als Bediensicherheit verstanden wird [Sch18]. Der UEQ ist in zahlreichen wissenschaftlichen Studien mit großen Stichproben validiert und weist eine hohe Reliabilität sowie Konstruktvalidität auf. Trotz einzelner niedriger Reliabilitätswerte in dieser Untersuchung werden daher alle Daten in die Auswertung einbezogen.

Auswertung der Skalen und der Qualitätsaspekte

Die Mittelwert-Analyse der einzelnen Skalen verdeutlicht eine insgesamt neutrale Haltung der Studierenden gegenüber der App (vgl. Abb. 7.11). Ein möglicher Grund könnte in den unterschiedlichen Vorerfahrungen mit AR-Anwendungen liegen. Die Vermutung liegt nahe, dass erfahrene Teilnehmer:innen die App aufgrund höherer Erwartungen kritischer beurteilen, während Personen ohne vorherige Berührungspunkte mit AR-Apps tendenziell positiver reagieren. Diese These lässt sich jedoch angesichts der geringen Stichprobengröße für eine Korrelationsanalyse nicht validieren. Die Werte für Effizienz (0,11) und Zuverlässigkeit (0,17) – jeweils auf einer Skala zwischen -3 und +3 – fallen sehr niedrig aus, was durch Nutzendenfeedback zu Interaktionsproblemen bestätigt wird. Zudem weisen die Skalen eine hohe Standardabweichung auf, etwa 1,5 bei Durchschaubarkeit und 1,3 bei Stimulation. Diese Streuung könnte ebenfalls auf das variierende Erfahrungsniveau der Teilnehmenden mit AR-Apps zurückführbar sein.

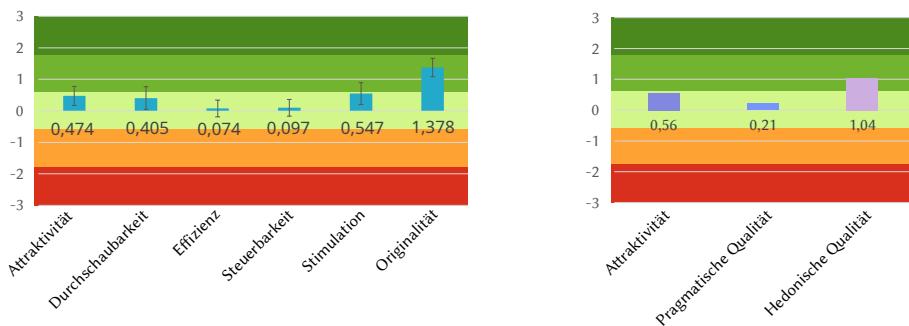


Abbildung 7.11: Gesamtergebnis des UEQ hinsichtlich der verschiedenen Skalen und Qualitätsaspekte

Die Werte für Attraktivität sowie pragmatische und hedonische Qualität der App bewegen sich zwischen niedrig und mittel (vgl. Abb. 7.11). Besonders die pragmatische Qualität erreicht mit einem Mittelwert von 0,21 einen sehr niedrigen Wert, was auf Instabilitäten und Interaktionsprobleme der App zurückzuführen ist. Dies beeinträchtigt auch die Gesamtattraktivität, die einen Mittelwert von 0,56 aufweist.

Im Gegensatz dazu fällt die hedonische Qualität mit einem Mittelwert von 1,04 positiver aus. Die wahrgenommene Neuartigkeit motiviert viele Studierende, die App über die vorgesehenen fünf Minuten hinaus zu nutzen.

Auswertung der Items und Benchmark-Test

Bei der Analyse einzelner Items stechen insbesondere Item 8 (*unvorhersehbar – vorhersehbar*) und Item 9 (*schnell – langsam*) mit Mittelwerten von -0,4 bzw. -0,8 negativ hervor. Dies lässt sich durch lange Reaktionszeiten der App und die Notwendigkeit mehrerer Berührungen erklären, bis eine Eingabe korrekt erfasst wird. Die Verzögerungen führen zu erhöhter Frustration bei den Teilnehmenden, was sich sowohl in Gesprächen als auch durch beobachtetes Nutzungsverhalten widerspiegelt (siehe Kapitel 7.4.5).

Der UEQ ermöglicht den Vergleich der Ergebnisse mit Daten aus anderen Studien. Zum Zeitpunkt der Evaluation umfasst die Benchmark-Datenbank⁴⁷ 401 Untersuchungen mit über 18.483 Teilnehmenden. Die folgende Abb. 7.12 zeigt die App im direkten Vergleich zu diesen Referenzwerten.

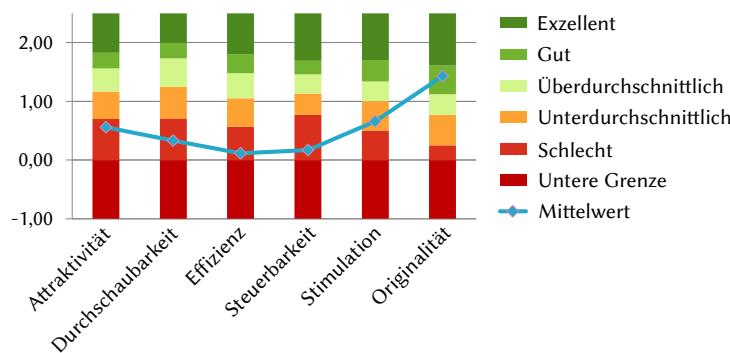


Abbildung 7.12: Benchmark der AR-App im Vergleich zu anderen Studien, die mit dem UEQ erfasst wurden

Auch hier zeigt sich, dass die App insgesamt mittel bis schlecht abschneidet und lediglich bei der Originalität punktet. Besonders kritisch im Vergleich sind die Effizienz und Steuerbarkeit der App.

⁴⁷ Benchmark bezeichnet einen Referenzpunkt oder Vergleichsstandard, der als Kriterium zur Bewertung und zum Vergleich von Leistungen, Eigenschaften oder Qualitätsmerkmalen dient [LP95].

7.4.5 Ergebnisse zum Onboarding

Die Ergebnisse aus Tabelle 7.3 verdeutlichen, dass das Onboarding der AR-App hinsichtlich der Verständlichkeit der Instruktionen mit einem Mittelwert von $M = 3,85$ (von 5) insgesamt positiv bewertet wird. Auch die Selbsterklärungsfähigkeit der Funktionen schneidet mit $M = 3,15$ tendenziell gut ab. Schwächen zeigen sich hingegen bei der Übersichtlichkeit der Funktionen ($M = 2,83$), der Reaktionsgeschwindigkeit auf Nutzendeneingaben ($M = 2,66$) und insbesondere bei der Stabilität und Zuverlässigkeit der Anwendung, die mit einem Mittelwert von $M = 2,34$ am niedrigsten bewertet wird.

Tabelle 7.3: Häufigkeitsverteilung, Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der Bewertung für die Fragen 2.1 bis 2.5 im Abschnitt 1 des Fragebogens mit 1 = „trifft gar nicht zu“ und 5 = „trifft voll zu“.

ID	Frage	1	2	3	4	5	M	SD
2.1	Die Instruktionen der App fand ich hilfreich.	1	3	5	24	8	3,85	0,9
2.2	Ich hatte schnell einen Überblick über die verschiedenen Funktionen der App.	4	14	11	9	3	2,83	1,1
2.3	Die Funktionen der App sind selbsterklärend.	2	11	12	11	5	3,15	1,09
2.4	Die App reagiert schnell auf Eingaben.	9	13	6	9	4	2,66	1,3
2.5	Die App läuft stabil und zuverlässig, ohne Abstürze oder Eingabeverzögerungen.	10	15	10	4	2	2,34	1,1

Diese Ergebnisse decken sich mit Beobachtungen während der App-Nutzung sowie den Feedbackgesprächen und den insgesamt 12 Freitextantworten. Die qualitative Analyse dieser Rückmeldungen ergibt vier thematische Cluster, die in Tabelle 7.4 zusammengefasst sind.

Am häufigsten kritisieren die Teilnehmenden die Interaktion mit der App, insbesondere im Hinblick auf die Reaktionsgeschwindigkeit und die Empfindlichkeit gegenüber Eingaben. Schwierigkeiten bei der Positionierung der virtuellen Geräte sowie bei der Steuerung von Bedienelementen, etwa an Drehreglern, treten mehrfach auf. Aussagen wie „*Drehregler des Oszilloskops ungenau zu bedienen*“ oder „*Sensitivität auf Toucheingabe nicht sehr hoch*“ verweisen auf eine

Tabelle 7.4: Clusterbildung der Freitextantworten mit Häufigkeiten

Cluster	Häufigkeit
Interaktion (Reaktionszeit, Sensitivität, Bedienung, Positionierung etc.)	10
Mehrwert von AR	6
Verständnis von AR	5
Performance (Stabilität)	4

eingeschränkte Bedienbarkeit. Diese Rückmeldungen spiegeln sich im niedrigen Mittelwert zur Reaktionsgeschwindigkeit ($M = 2,66$) wider.

Auch die allgemeine Performance der Anwendung wird negativ beurteilt. Verzögerte Reaktionen, lange Ladezeiten und Instabilität während der Nutzung führen bei den Teilnehmenden zu Frustration. Aussagen wie „*App sehr langsam*“ oder „*reagiert nicht immer auf Berührungen*“ belegen die wahrgenommene Instabilität, was sich mit dem geringen Mittelwert zur Systemzuverlässigkeit ($M = 2,34$) deckt.

Darüber hinaus scheint weder das Konzept von AR, noch dessen didaktischer Mehrwert den Teilnehmenden verständlich zu sein. Erstere wird durch Irritation darüber, dass die Kamera immer aktiv im Hintergrund läuft, ersichtlich. Ebenfalls zurückzuführen auf die erschwerte Interaktion äußerten viele Teilnehmende den Wunsch einer Zoom-Funktion. Dieser steht jedoch dem grundlegenden Interaktionsprinzip in AR entgegen, da hier die virtuellen Objekte im realen Raum verankert sind und erst durch eine Annäherung mit dem Smartphone vergrößert werden.

Der vermeintlich nicht vorhandene Mehrwert der AR-Technologie spiegelt sich in Aussagen wie „*Vielleicht wäre eine normale App nützlicher*“ oder „*Ich kann keinen zusätzlichen Nutzen durch die Verwendung von AR erkennen*“. Einige Teilnehmende betrachten herkömmliche Apps oder eine Kombination aus virtuellen und realen Laboren, wie das *myDAQ* von *National Instruments*, als besser geeignet für die Vorbereitung auf Laborpraktika. Dies deutet darauf hin, dass der Zweck und die Vorteile der AR-Anwendung einigen Teilnehmenden nicht verständlich sind.

Neben den Schwierigkeiten bei der Bedienung zeigt sich in den Feedbackgesprächen, dass die Instruktionen im Tutorial zu kleinschrittig sind. Einige Proband:innen folgen den Anweisungen mechanisch, ohne den Inhalt vollständig zu erfassen. Ein Teilnehmer äußerte sich mündlich, er hätte „*keine Ahnung [gehabt], was [...] [er] da gerade mache*“. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, den einzelnen Instruktionen klarere inhaltliche Bezüge zu den jeweiligen Funktionsbereichen des Oszilloskops zuzuordnen.

7.5 Zusammenfassung und Reflexion

7.5.1 Zusammenfassung

In der Softwareentwicklung, insbesondere für mobile Apps, ist der erste Kontakt von hoher Bedeutung, da Nutzer:innen oft bereits nach wenigen Sekunden entscheiden, ob sie eine Anwendung weiterverwenden oder löschen. Besonders bei komplexen Anwendungen wie AR-Lernumgebungen kann eine fehlende oder unzureichende Einführung zu kognitiver Überlastung und Frustration führen. Das Onboarding, das in den meisten Fällen den ersten Begegnungspunkt der Anwender:innen mit einer App darstellt, spielt daher eine zentrale Rolle für den ersten Eindruck und beeinflusst maßgeblich, ob eine Anwendung langfristig genutzt wird (Forschungsfrage **F1**).

Es existieren drei gängige Onboarding-Formen: nutzenorientiertes Onboarding hebt zentrale Vorteile der Anwendung hervor, funktionsorientiertes Onboarding erklärt wesentliche Bedienelemente und progressives Onboarding integriert die Einführung direkt in die Nutzung.

Die hier entwickelte AR-App kann durch ihren empty state, die teils ungewöhnliche Interaktionsweise und die detailgetreue Darstellung der Laborgeräte kognitive Überlastung verursachen. Vor diesem Hintergrund eignen sich insbesondere ein funktionsorientiertes Onboarding (Einführung zentraler Bedienelemente) und ein progressives Onboarding (schrittweise Anleitung während der Nutzung), womit sich die zweite Forschungsfrage (**F2**) beantworten lässt.

Die App-Version 0.17.01 konzentriert sich ausschließlich auf das Onboarding, um den Einfluss auf den ersten Eindruck gezielt zu untersuchen. Daher besteht die gesamte App-Nutzung aus einer klar strukturierten Abfolge von Erklärungen und Instruktionen: Die Nutzer:innen platzieren zunächst ein virtuelles Oszilloskop im Raum, koppeln es mit einem Funktionsgenerator und lernen die zentralen Bedienelemente der virtuellen Geräte kennen (**F3**).

Die Kombination beider Onboarding-Formen und die visuellen Hilfen ermöglichen eine schrittweise Einführung sowohl in die App, als auch in die Laborgeräte selbst und erleichtern den Einstieg. Um die Aufmerksamkeit gezielt zu lenken, werden ausschließlich relevante Bedienelemente hervorgehoben, während weniger wichtige Funktionen deaktiviert bleiben. Auf diese Weise wird der Fokus geschärft und gleichzeitig kognitive Belastung reduziert (**F3** und **F4**).

Aus didaktischer Sicht trägt das Onboarding zu einer schnelleren Orientierung und einem motivierenden Einstieg bei. Gleichzeitig zeigen sich jedoch auch mögliche Nachteile. Beispielsweise kann eine zu starke Anleitung eigenständiges Erkunden behindern, während sehr kleinschrittige Instruktionen dazu führen,

dass Nutzer:innen Aufgaben mechanisch ausführen, ohne ein tieferes Verständnis zu entwickeln. Aus technischer Perspektive wirken sich ungenaue Erkennungen oder verzögerte Reaktionen negativ auf die Nutzererfahrung aus und können Frustration hervorrufen, womit Forschungsfrage **F4** zu den Vor- und Nachteilen des Onboardings beantwortet wird.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage **F5** wird das entwickelte Onboarding mithilfe des UEQ evaluiert. Ergänzend werden Angaben zur technischen Vorerfahrung sowie Freitextantworten zu Verständlichkeit und Nutzerführung erhoben.

Die Studie umfasst 41 Studierende, die die Anwendung auf identischen LG G5 Smartphones testen, um gerätespezifische Unterschiede auszuschließen. Die Evaluation zeigt, dass das Onboarding-Konzept überwiegend positiv wahrgenommen wird, während die konkrete Umsetzung Verbesserungspotenzial bietet. So bewerten 3/4 der Teilnehmenden die Anleitung als hilfreich, jedoch werden insbesondere die Steuerung und Reaktionsgeschwindigkeit der App kritisch gesehen. Verzögerungen und fehlerhafte Eingabeerkennungen führen zu Frustration und beeinträchtigen die Interaktion. Dies spiegelt sich auch in den UEQ-Skalen für die Qualität wider: Die pragmatische Qualität fällt mit einem Mittelwert von 0,21 erwartungsgemäß niedrig aus und beeinflusst die Gesamtattraktivität der App (0,56) negativ. Gleichzeitig zeigt die hohe Bewertung der hedonischen Qualität (1,04), dass die Neuartigkeit der Anwendung motivierend wirkt. Dies zeigt sich auch darin, dass viele Teilnehmende die App über die geplante Zeit hinaus nutzen. Dennoch äußern einige Teilnehmende Skepsis gegenüber dem praktischen Nutzen von AR und bevorzugen herkömmliche Anwendungen. Die Ergebnisse bestätigen bereits im Vorfeld bekannte Einschränkungen des Wikitude-SDK und unterstreichen die Notwendigkeit technischer Optimierungen sowie einer klareren Vermittlung des Mehrwerts der AR-Technologie.

Durch die Gespräche und die Freitextkommentare können gemäß des Usability-Engineering-Lebenszyklus für die Entwicklung von UIs [MM99] zahlreiche nützliche Informationen gewonnen werden, um die App weiter zu optimieren. Diese Optimierungen sind in der App umgesetzt und werden nachfolgend in der Reflexionsphase näher erläutert.

7.5.2 Reflexion: Erweiterung des Onboardings

Mit der Weiterentwicklung der App steigt auch deren Komplexität, insbesondere durch die Integration neuer SDKs mit veränderten Methoden zur Erkennung ebe-ner Flächen. Das neue Onboarding ist im folgenden Ablaufdiagramm dargestellt (siehe Abb. 7.13):

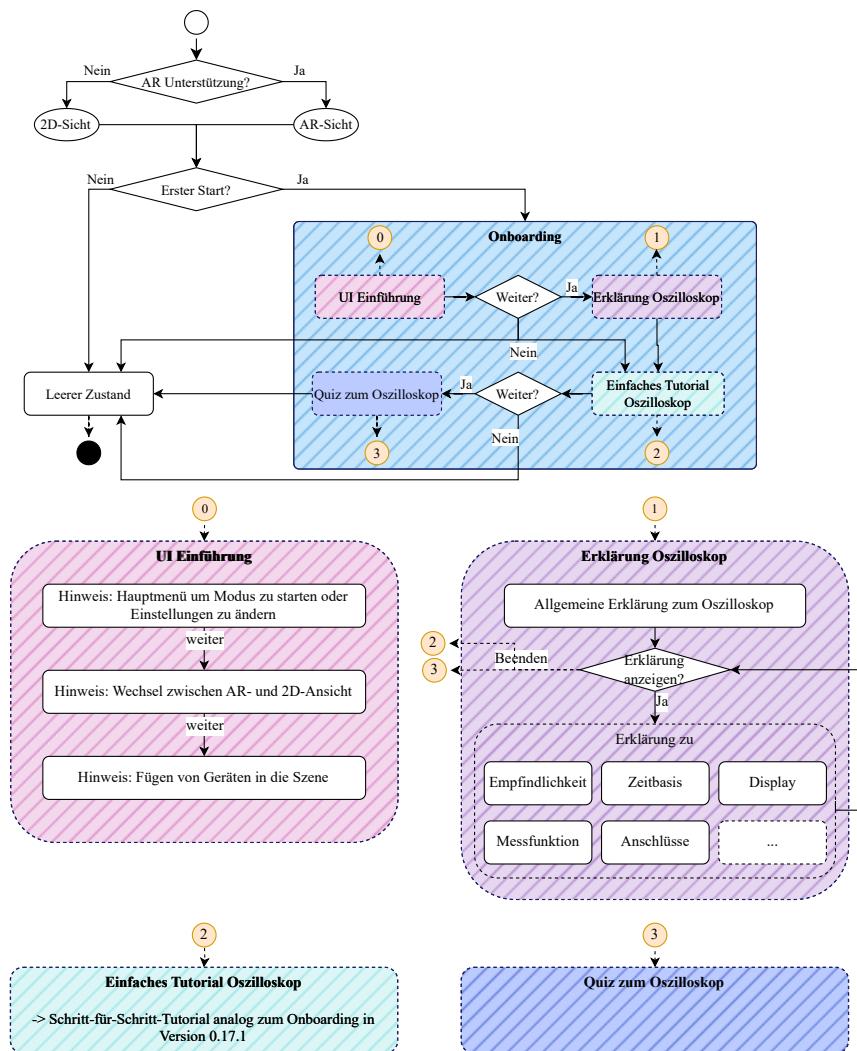


Abbildung 7.13: Ablaufdiagramm zum Onboarding in der weiterentwickelten mobilen AR-App.

Eine wesentliche Erweiterung stellt die kurze, obligatorische Einführung in die Nutzungsoberfläche dar. Sie ist erforderlich, da neue Funktionen und Bedienelemente hinzugekommen sind, darunter der *Ansicht-Button*, mit dem zwischen AR- und 2D-Modus gewechselt werden kann. Diese Möglichkeit einer Darstellungsänderung ergibt sich sowohl aus technischer Sicht, da nicht alle Smartphones die neuen SDKs unterstützen, als auch durch die Auswertung der Studie und dem Wunsch einer alternativen Visualisierungsform der Laborgeräte. Nach Abschluss dieser UI-Einführung lässt sich das Onboarding vorzeitig beenden. Anschließend haben Nutzer:innen die Wahl zwischen verschiedenen Optionen:

1. eine allgemeine Einführung in die Funktionen des Oszilloskops (Level 1),
2. die Schritt-für-Schritt-Anleitung aus der vorherigen App-Version 0.17.01 (Level 2),
3. ein Quiz zur Bedienung des Oszilloskops (Level 3) oder
4. die freie Erkundung der App (Level 4).

In der Oszilloskop-Einführung (Level 1) wird eine allgemeine Übersicht zur Anwendung und Nutzungsoberfläche des Oszilloskops vermittelt. Die Anleitungen (Level 2) gliedern sich in drei Kompetenzbereiche, wobei jede Anleitung einen anderen Aspekt des Oszilloskops bzw. Funktionsgenerators vermittelt. Das Quiz (Level 3) besteht aus einem zufällig angelegten Signal, das nicht vollständig auf dem Oszilloskop-Bildschirm dargestellt ist und dessen Parameter durch eine korrekte Bedienung des Oszilloskops bestimmt werden müssen. Und schließlich gelangen die Nutzer:innen mit der Wahl auf den freien Modus (Level 4) in den leeren Zustand der App.

Aufgrund der erweiterten Funktionen und des neuen Menüs ist auch der leere Zustand entsprechend in den Folgeversionen überarbeitet (siehe Abb. 7.9 (b))

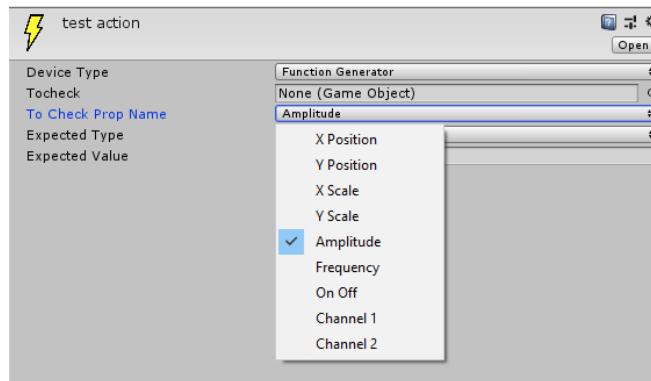


Abbildung 7.14: Erweiterungs-Skript in Unity3D um grafische Schritt-für-Schritt-Anleitungen zu erstellen.

Die modulare Entwicklung der App, insbesondere durch eine speziell für Unity3D konzipierte Erweiterung, ermöglicht eine flexible Gestaltung von Schritt-für-Schritt-Anleitungen und Anpassung des Onboardings ohne Programmierkenntnisse (vgl. Abb. 7.14). Dadurch lassen sich erweiterte Onboarding-Szenarien und Tutorials, etwa für MR-Brillen, gezielt anpassen, ohne grundlegende Änderungen an der gesamten Anwendung vorzunehmen. Das Onboarding ist für diese Brillen daher ausschließlich im Bereich der neuen Nutzungsoberfläche und der Interaktionsmechanik erweitert, wie in Abb. 7.15 dargestellt.

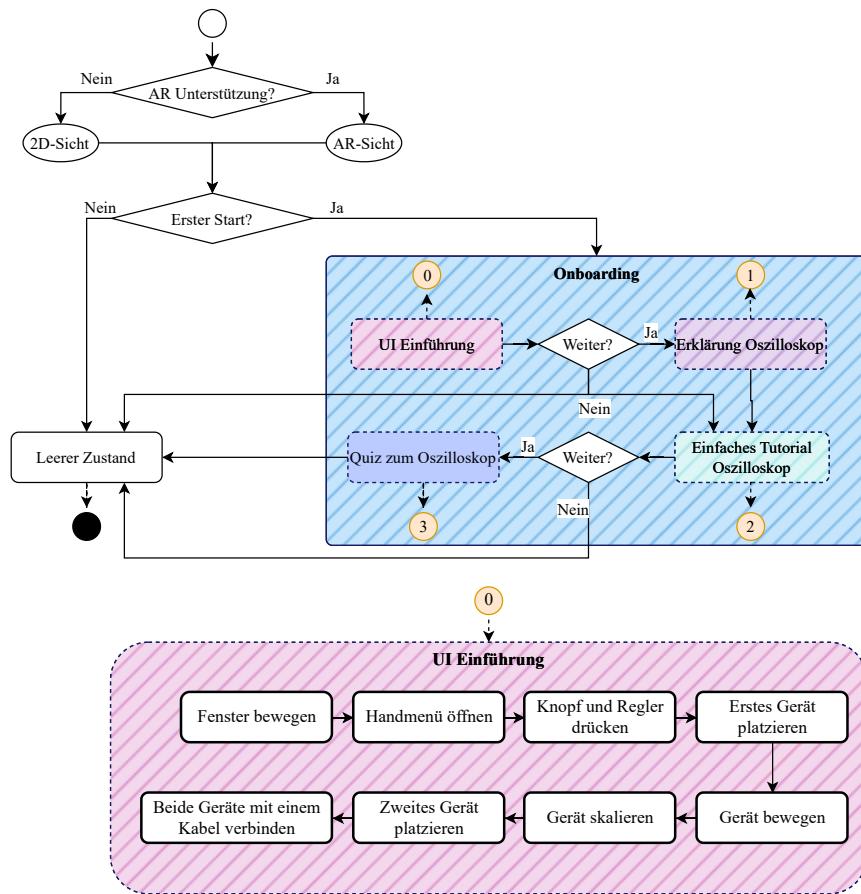


Abbildung 7.15: Ablaufdiagramm zum Onboarding für MR-Brillen. Bis auf die UI-Einführung ist der Rest des Onboardings unverändert geblieben.

In der App-Version für MR-Brillen (V1.13) sind an kritischen Stellen indirekte Hilfen oder Hinweise in Form von Pfeilen bereitgestellt, die bei Bedarf deaktiviert werden können [ILM09]. Unaufgeforderte Unterstützung bleibt, wie in [Ech14] empfohlen, auf ein Minimum beschränkt, um Unterbrechungen während der Nutzung zu vermeiden. Über ein Menü in den Einstellungen lässt sich das Onboarding erneut durchlaufen – beispielsweise nach längerer Nutzungspause oder wenn eine neue Person das Gerät übernimmt, auf dem das Onboarding bereits abgeschlossen wurde [Sai13].

Während das Onboarding den Einstieg in die Nutzung der App erleichtert, stellt sich im weiteren Verlauf die Frage, wie sich deren tatsächliche Wirkung auf kognitive Prozesse beim Umgang mit Laborgeräten erfassen lässt. Um dies zu untersuchen, wird im folgenden Exkurs-Kapitel ein Ansatz auf Basis von Eye-Tracking vorgestellt.

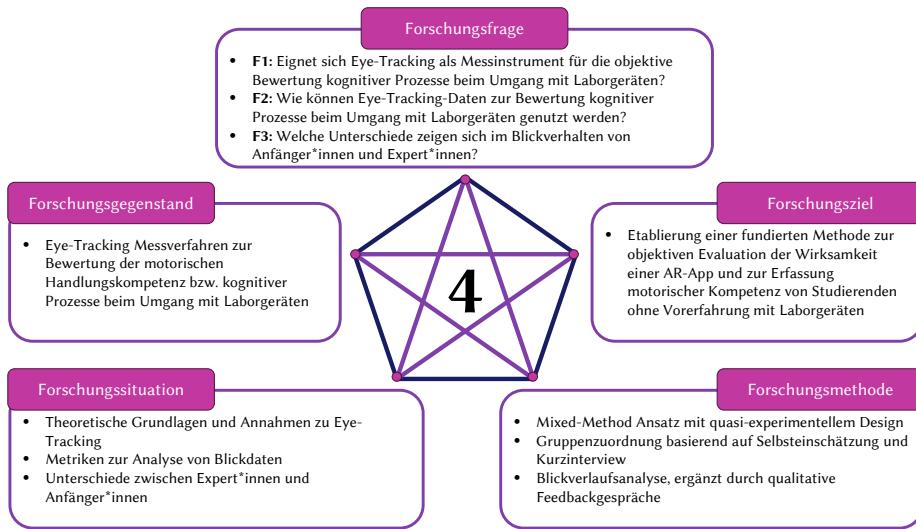


Abbildung 8.1: Research Pentagon zum Eyetracking als Messinstrument für die Wirksamkeitsstudie

8.1 Problemstellung, Forschungsfragen und -ziel

Nach der konzeptionellen Entwicklung und Umsetzung der App steht nun die empirische Evaluation im Vordergrund. Ziel ist es, die durch die App angestoßenen Lernprozesse sichtbar zu machen und deren Wirksamkeit im Umgang mit Laborgeräten nachzuweisen.

Da bislang keine geeigneten Verfahren existieren, um diese kognitiven Prozesse (bzw. kognitive Handlungsregulation) quantitativ zu erfassen [Bau23], soll in diesem Exkurs ein entsprechendes Messinstrument entwickelt und pilotiert werden.

Die zentrale Forschungsfrage **F1** lautet daher: *Inwiefern ermöglicht Eye-Tracking eine objektive Bewertung von kognitiven Prozessen beim Umgang mit Laborgeräten?*

Ergänzend dazu werden folgende untergeordnete Fragen untersucht:

- **F2:** Wie können Eye-Tracking-Daten zur Bewertung kognitiver Prozesse beim Umgang mit Laborgeräten genutzt werden?
- **F3:** Welche Unterschiede zeigen sich im Blickverhalten von Anfänger:innen und Expert:innen?
- **F4:** Eignet sich Eye-Tracking auch zur objektiven Erfassung motorischer Fähigkeiten?

Das Ziel dieses Research Pentagons besteht folglich darin, eine Methode zu erforschen, die die Wirksamkeit der AR-App zur Förderung der kognitiven Handlungsregulation – insbesondere bei unerfahrenen Studierenden – bewertet. Dazu werden Eye-Tracking-Daten von Studierenden ohne Vorerfahrung mit den Blickmustern erfahrener Laboringenieure bei der Bearbeitung einer Aufgabe am realen Oszilloskop verglichen. Dieser Ansatz ermöglicht eine spätere Beurteilung des Lernfortschritts nach der Nutzung der AR-App und liefert gleichzeitig Rückschlüsse auf das vorhandene Vorwissen sowie die motorischen und kognitiven Strategien der Teilnehmenden.

8.2 Forschungsmethode

Die angewandte Forschungsmethodik beruht auf einem Mixed-Method-Ansatz mit einem quasi-experimentellen Design, bei dem eine Zuweisung der Teilnehmenden zu Gruppen ohne Zufallsprinzip erfolgt [DB16]. Vielmehr werden die Teilnehmenden nach einer Selbsteinschätzung und einem vorangehenden Kurzinterview als Expert:in oder Noviz:in klassifiziert. Zusätzlich zu den quantitativen Daten aus der Blickverlaufsanalyse werden durch ein Feedbackgespräch nach dem Test qualitative Daten erhoben. Die Abb. 8.2 stellt das Forschungsdesign grafisch dar.

Die Reliabilität der Messwerte wird durch die strikte Befolgung der in Abb. 8.2 festgelegten Schritte unter identischen Testbedingungen für jeden Teilnehmenden sichergestellt. Dies umfasst zunächst eine Einführung in die Studie, um die Proband:innen über die Motivation und den Ablauf der Studie zu informieren. Dazu zählt insbesondere die Vermeidung von Kopfbewegungen während der Kalibrierungsphase, um Messungenauigkeiten vorzubeugen.

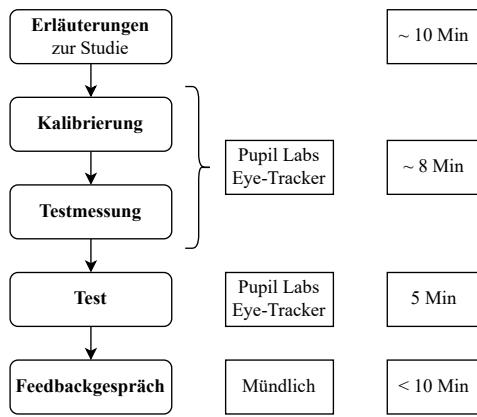


Abbildung 8.2: Forschungsmethode bzw. Ablauf der Eye-Tracking-Studie für jede:n einzelne:n Proband:in

Die anschließende Kalibrierung der Eye-Tracking-Brille erfolgt auf einem großformatigen Papierbildschirm, auf dem neun verdeckte Marker nacheinander sichtbar gemacht werden. Nach Abschluss dieser Phase ermöglicht ein zusätzlicher Marker die Identifikation und spätere Korrektur systematischer Fehler wie Offsets. Sobald die Kalibrierungswand entfernt und das dahinter befindliche Oszilloskop sichtbar wird, beginnt die eigentliche Testphase. Gleichzeitig wird das Arbeitsblatt umgedreht. Die Bearbeitungszeit ist auf fünf Minuten begrenzt, um mögliche Ermüdungseffekte der Augen zu minimieren, insbesondere aber auch um eine einheitliche Datengrundlage für die Blickpfad-Analyse zu gewährleisten.

Während der Untersuchung werden sowohl messspezifische Auffälligkeiten als auch ungewöhnliche Verhaltensweisen der Teilnehmenden dokumentiert (siehe Abb. 8.3). Diese Beobachtungen fließen in ein anschließendes Nachgespräch ein, in dem die angewandten Lösungsstrategien reflektiert werden, was eine detailliertere Analyse der Ergebnisse ermöglicht. Nach jedem Durchgang wird das Oszilloskop durch Skalieren und Verschieben des Signals zurückgesetzt.

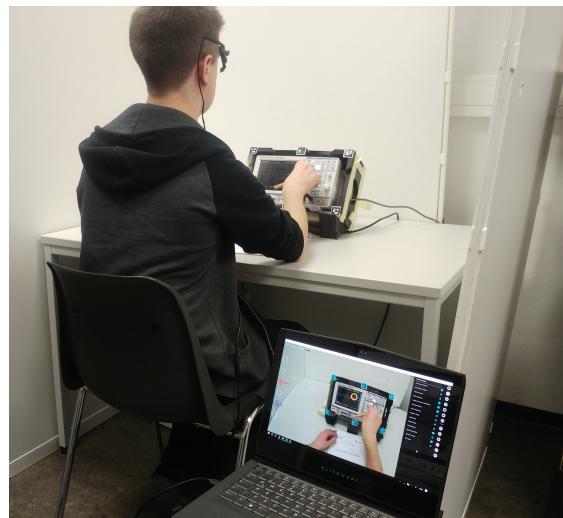


Abbildung 8.3: Versuchsaufbau und Aufnahme während der Studiendurchführung

8.3 Forschungssituation: Annahmen und Grundlagen zu Eye-Tracking

8.3.1 Eye-Tracking als Forschungsmethode

Eye-Tracking findet sowohl in der Industrie, beispielsweise bei der Entwicklung von Produkten und Nutzungsoberflächen, als auch in verschiedenen Forschungsbereichen breite Anwendung [Has20; NA12]. Moderne Eye-Tracking-Systeme erfassen präzise, welche Objekte in welcher Reihenfolge, zu welcher Zeit und wie lange betrachtet werden. Dadurch lassen sich Rückschlüsse auf die Denkprozesse und Aufgabenlösungsstrategien der Teilnehmenden ziehen [Hol+11]. Darüber hinaus eignet sich Eye-Tracking zur Untersuchung von Unterschieden zwischen Expert:innen und Noviz:innen bei der Bearbeitung spezifischer Aufgaben. Durch den Vergleich von Blickmustern lassen sich typische Verhaltensweisen und Strategien identifizieren [Löw24]. Prä- und Posttests mit Eye-Tracking bieten zudem eine Möglichkeit, die Wirksamkeit von Lernszenarien zu evaluieren, indem Unterschiede in den Aufgabenlösungsstrategien zwischen unerfahrenen und erfahrenen Studienteilnehmenden analysiert werden [Has20].

8.3.2 Annahmen für Eye-Tracking-Studien

Die grundlegenden Prämissen der Eye-Tracking-Forschung gehen auf Just und Carpenter (1980) zurück und sind als *Eye-Mind-Hypothese* bekannt [JC80]. Diese Hypothese beruht auf zwei zentralen Annahmen: Die erste besagt, dass sich aus den Fixationsmustern Rückschlüsse auf die kognitive Verarbeitung der Versuchsperson in Echtzeit ziehen lassen [IR86; Lev13]. Obwohl diese Prämisse durch zahlreiche empirische Studien gestützt wird [Has20], besteht keine absolute Kongruenz zwischen visuellem und kognitivem Fokus. Beispielsweise kann eine Person gedanklich eine Aufgabe lösen, während sie ins Leere blickt oder die Augen schließt [FG98]. Die zweite Annahme geht davon aus, dass die Dauer einer Fixation die Zeitspanne widerspiegelt, in der eine kognitive Auseinandersetzung mit dem betrachteten Inhalt oder Objekt stattfindet [BS06; Vel+05]. Studien bestätigen diesen Zusammenhang weitgehend, allerdings zeigen alltägliche Beobachtungen, dass eine lange Fixationsdauer nicht zwangsläufig auf eine aktive Verarbeitung hinweist, etwa wenn eine Person gedankenverloren einen Punkt fixiert [Lev13].

Das bedeutet, dass dieselben Daten und Metriken (siehe Kapitel 8.3.5) auf unterschiedliche Weise beurteilt werden können. Diese Unsicherheiten bei der Interpretation von Eye-Tracking-Daten erfordern eine Kombination mit anderen qualitativen Methoden wie *Lautem Denken* oder Post-Interviews, um eine valide Analyse zu gewährleisten [Hei16].

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Festlegung der Untersuchungsparameter, insbesondere der *Area of Interest (AOI)* und der Mindestdauer für eine Fixation. Eine einheitliche Definition der Dauer einer Fixation existiert nicht, um sie von Mikrbewegungen der Augen, sogenannte Sakkaden, zu unterscheiden, da sie vom Anwendungsfall bzw. vom Untersuchungsgegenstand abhängig ist [Has20]. In Lesestudien wird häufig eine Fixation ab 50 ms definiert, während bei der Analyse von Bildbetrachtung eine Mindestdauer von 300 ms bis 400 ms angesetzt wird [Ray98]. In dieser Studie wird, wie in den meisten vergleichbaren Untersuchungen, eine Fixationsdauer von 200 ms verwendet [JK03]. Zudem werden die Begriffe „Fixation“ und „Blick“ synonym verwendet.

8.3.3 Funktionsweise von Eye-Tracking-Systemen

Eye-Tracking-Systeme variieren hinsichtlich ihrer Invasivität und Messgenauigkeit, was sowohl die Bewegungsfreiheit der Proband:innen als auch die Validität

der erfassten Daten beeinflusst [Voß10]. Weniger invasive Systeme ermöglichen eine größere Bewegungsfreiheit, sind jedoch anfälliger für Messfehler, da Kopfbewegungen die Erfassung beeinträchtigen können. Hochinvasive Methoden minimieren Störfaktoren und liefern dadurch präzisere und reproduzierbare Ergebnisse. Die am häufigsten verwendete Technik ist die Cornea-Reflex-Methode [Duc07; Gei11]. Hierbei trifft **Infrarot-Licht (IR-Licht)** auf das Auge und wird von der Pupille reflektiert, während eine darauf ausgerichtete Kamera diese Reflexionen erfasst. Anhand dieser Daten lässt sich die Position der Pupillenmitte relativ zur Reflexion bestimmen [Voß10]. Vor der Nutzung erfordert das System eine Kalibrierung, um die Augenposition exakt mit der räumlichen Umgebung und dem Empfängersystem abzulegen (siehe Kapitel 8.2).

Aktuell kommen zwei Haupttypen von Eye-Tracking-Geräten zum Einsatz, die diese Technik nutzen: ferngesteuerte (engl. *remote*) Systeme und am Kopf getragene (engl. *head-mounted*) Tracker [Hey15]. In dieser Untersuchung wird ein head-mounted Eye-Tracker von *Pupil Labs* verwendet. Die Teilnehmenden tragen dabei ein Brillengestell mit zwei Kameras; eine erfasst die IR-Reflexionen der Augen, während die andere die Umgebung aus Perspektive der Testperson aufzeichnet. Obwohl dieses System die Bewegungsfreiheit nicht einschränkt, kann es als unangenehm empfunden werden und das Bewusstsein, Teil einer Studie zu sein, verstärken [Voß10].

8.3.4 Merkmale zwischen Expert:innen und Noviz:innen

Die Forschung zur Expertise befasst sich vorrangig mit den Leistungsunterschieden zwischen Expert:innen und Noviz:innen sowie mit Erklärungsansätzen für diese Differenzen [BR00; Hub14]. Dabei lassen sich zwei grundlegende Theorien unterscheiden: Einerseits wird Expertise als angeborenes Talent betrachtet, andererseits als erlernbare Kompetenz [Chi06]. Zwar ist der Begriff „Expert:in“ unterschiedlich definiert, doch alle Erklärungen betonen die Abgrenzung zu Noviz:innen [Hof98]. Zudem besteht keine starre Trennung zwischen beiden Gruppen, sondern vielmehr ein Spektrum unterschiedlicher Kompetenzstufen, wie z. B. das Dreyfus-Modell mit den fünf Entwicklungsstufen beschreibt (z. B. [Hon13]).

In dem hier betrachteten ingenieurwissenschaftlichen Kontext lassen sich Expert:innen durch mehrjährige Berufserfahrung und eine vertiefte Fachkompetenz auf den höchsten Niveaustufen (sieben und acht) des *Deutschen Qualifikationsrahmens (DQR)* kennzeichnen [AK11]. Sie sind in der Lage, „*Aufgaben und Probleme zielgerichtet, sachgerecht, methodisch und selbstständig zu lösen und das Ergebnis zu beurteilen.*“ [KMK21, S. 15]. Diese Auslegung umfasst alle La-

boringenieure und wissenschaftlichen Mitarbeitenden, die unmittelbar an der Durchführung und Betreuung der Laborpraktika beteiligt sind. Zur Überprüfung dieser Klassifizierung werden Kurzinterviews durchgeführt, die die Erfahrung der Teilnehmenden mit Laborgeräten und insbesondere mit Oszilloskopen erfassen (siehe Kapitel 8.2). Zusätzlich wird bei Laboringenieuren auch das betreute Praktikum bzw. der spezifische Versuch thematisiert.

Bereits in dieser Phase zeigte sich, dass eine dichotome Einteilung in Expert:innen und Noviz:innen problematisch ist. Während Studierende der Elektrotechnik im ersten oder zweiten Bachelorsemester ohne vorherige Laborerfahrung oder Ausbildung klar als Noviz:innen klassifiziert werden können, ist die Zuordnung fortgeschrittener Studierender aus höheren Semestern schwieriger. Obwohl diese bereits ein Laborpraktikum absolviert haben, betrachten sie sich selbst oft noch als Anfänger:innen. Es ist davon auszugehen, dass grundlegende Vorkenntnisse im Umgang mit Laborgeräten vorliegen, weshalb sie in eine dritte Kategorie – die der Fortgeschrittenen – fallen.

8.3.5 Areas of Interest und Metriken von Eye-Tracking-Daten

Zur Analyse von Eye-Tracking-Daten ist die Segmentierung des Untersuchungsobjekts in zu untersuchende oder besonders interessante Bereiche (engl. AOI) erforderlich. Dabei wird zwischen gitterartigen und semantischen AOIs unterschieden. Letztere eignen sich für Objekte mit klar abgegrenzten und inhaltlich zusammenhängenden Bereichen, wie HTML-Webseiten mit Kopfzeile, Navigation und Fußzeile [AT13]. Auch bei Oszilloskopen ist eine semantische Unterteilung sinnvoll, da zentrale Funktionen wie Skalierung, Triggerung und Messung klar definiert und bereits am Gerät räumlich voneinander getrennt und markiert sind.

Die Form der AOIs hängt vom Anwendungsfall ab und reicht von kreisförmigen bis zu elliptischen oder rautenförmigen Mustern. Zudem können AOIs überlappen oder in kleinere Sub-AOIs unterteilt sein. Bereiche, die nicht von Interesse sind, lassen sich als sogenannte *Whitespace-AOI* definieren und für die weitere Analyse herausrechnen [Hey15].

Zur Analyse von AOIs kommen verschiedene Metriken zum Einsatz, die Einblicke in die visuelle Informationsverarbeitung und kognitive Prozesse ermöglichen. Die wichtigsten Parameter sind:

- **Fixationshäufigkeit (Fixationsfrequenz):** Diese Metrik gibt an, wie oft ein bestimmter AOI erneut fixiert wird. Eine hohe Fixationsrate deutet auf eine gesteigerte Relevanz des Bereichs hin, da bedeutsame Inhalte tendenziell häufiger betrachtet werden. Gleichzeitig kann eine ungewöhnlich hohe Fixationsrate auf Verständnisprobleme hinweisen, wenn Nutzer:innen wiederholt zu einem Bereich zurückkehren, um Informationen zu verarbeiten oder zu überprüfen [PB06; SG00].
- **Verweildauer (Blickverweildauer):** Die Verweildauer umfasst die gesamte Zeit, die innerhalb eines AOIs verbracht wird. Sie setzt sich aus der Summe aller Fixationen und Sakkaden innerhalb des Bereichs zusammen. Eine lange Verweildauer kann auf erhöhte Relevanz hinweisen, aber auch darauf, dass ein Bereich schwer verständlich ist oder besondere Aufmerksamkeit erfordert. Zwei Perspektiven lassen sich dabei unterscheiden: Die *benutzendenorientierte Sichtweise* betrachtet eine lange Verweildauer als möglichen Hinweis auf kognitive Herausforderungen oder eine erhöhte Verarbeitungszeit, während die *objektorientierte Perspektive* sie als Indikator für die besondere Relevanz eines Bereichs wertet [JK03]. Nach Fitts et al. (2005) erschwert eine erhöhte Verweildauer die Informationsaufnahme, während eine hohe Fixationsfrequenz auf wichtige Inhalte hindeutet ([FJM05] und [HA17]).
- **Blickpfade (engl. Scanpaths):** Blickpfade beschreiben die Sequenz von Fixationen und Sakkaden über verschiedene AOIs und ermöglichen Rückschlüsse auf die Navigation innerhalb einer visuellen Umgebung. Sie zeigen, wie Nutzer:innen Informationen verarbeiten und welche Strategie sie zur Problemlösung oder Orientierung anwenden [Duc07].
- **Pupillendilatation:** Die Veränderung des Pupillendurchmessers dient als Indikator für kognitive Belastung und emotionale Reaktionen. Eine stärkere Erweiterung der Pupille kann auf erhöhte mentale Anstrengung oder eine stärkere emotionale Beteiligung hinweisen [Fie+22].

Auf Grundlage dieser Metriken erfolgt im Folgenden die konkrete Umsetzung der Eye-Tracking-Studie zur Untersuchung des Blickverhaltens beim Umgang mit Laborgeräten.

8.4 Forschungsgegenstand: Entwicklung und Auswertung der Eye-Tracking-Studie

8.4.1 Verwendete Materialien

Messinstrument: Eye-Tracker

Die Qualität der Eye-Tracking-Daten hängt maßgeblich von den technischen Spezifikationen des eingesetzten Geräts ab, insbesondere von der Abtastrate und der Messgenauigkeit. In dieser Untersuchung kommt ein Eye-Tracker von Pupil Labs zum Einsatz, der auf *Open-Source*- und *Open-Hardware*-Prinzipien basiert und eine Präzision von $0,82^\circ$ aufweist⁴⁸. Diese Genauigkeit ist entscheidend für die exakte Erfassung von Fixationen auf kleinen Flächen oder bei weiter entfernten Objekten. Beispielsweise führt eine Messgenauigkeit von $1,8^\circ$ bei einer Distanz von 60 cm zu einer Abweichung von 1,9 cm, während sie bei 3,5 m bereits 11 cm beträgt. Die Genauigkeit beschreibt somit die Abweichung bei der Erfassung der Fixationspunkte.

Labogeräte und Versuchsaufbau

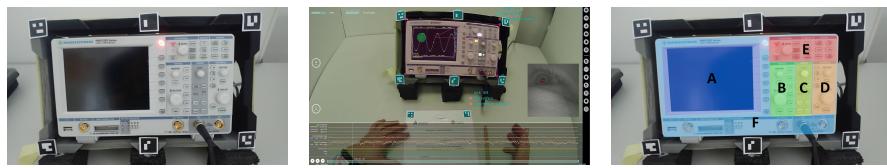
Für die Testdurchführung wird ein Funktionsgenerator vorab auf ein Sinussignal mit einer Frequenz von 2.480 Hz und einer Amplitude von 2,48 V_{SS} eingestellt. Der Generator bleibt für die Teilnehmenden verborgen und ist über eine Koaxial-Leitung mit einem Oszilloskop des Typs *HMO1002* von Rohde & Schwarz verbunden, das auch im Laborpraktikum A zum Einsatz kommt. Das Signal am Oszilloskop wird so verstellt, dass es außerhalb des sichtbaren Bereichs liegt. Die Aufgabe der Teilnehmenden besteht darin, das Signal mit den entsprechenden Funktionen des Oszilloskops sichtbar zu machen und die Signalparameter zu bestimmen. Die Auto-Taste bleibt dabei deaktiviert, sodass ausschließlich manuelle Einstellungen und Messfunktionen zur Verfügung stehen.

Der Versuchsaufbau ist bewusst reizarm gehalten. Auf dem Testplatz befinden sich lediglich das Oszilloskop, ein Stift und das umgedrehte Arbeitsblatt (siehe Anhang S. XXVIII). Stellwände an den Seiten schirmen die Testumgebung ab und minimieren visuelle Ablenkungen (siehe Abb. 8.3). Um systematische Fehler durch externe Infrarotquellen, etwa Sonnenlicht, zu vermeiden, erfolgt

48 Detaillierte Spezifikationen unter: <https://pupil-labs.com>

die Untersuchung in einem abgedunkelten Labor mit kontrollierter künstlicher Beleuchtung.

Zur Vorbereitung auf die spätere Analyse ist das Anbringen von Markern oder Referenzpunkten am Untersuchungsobjekt erforderlich. Typischerweise definiert ein einzelner Punkt ein standardisiertes Koordinatensystem zur Festlegung eines AOIs. Um jedoch Fehler zu minimieren, die durch eine unvollständige Marker-Erfassung entstehen können, werden sechs solcher Referenzpunkte um das Oszilloskop angebracht. Diese bilden gemeinsam ein einziges, zusammenhängendes AOI, das jederzeit zuverlässig bestimmbar ist. In einem weiteren Analyseschritt erfolgt die Segmentierung in spezifische Sub-AOIs, wodurch detaillierte Analysebereiche entstehen, die eine präzisere Auswertung ermöglichen. Die Abbildungen in 8.4 stellen das Oszilloskop vor (8.4 (a)), während (8.4 (b)) und nach der Versuchsdurchführung (8.4 (c)) dar.



(a) Oszilloskop mit Markern für spätere Definition der AOIs aus Perspektive der Proband:innen

(b) Oszilloskop während der Versuchsdurchführung mit Definition des großen AOIs

(c) Oszilloskop mit den jeweiligen Sub-AOIs im Python-Skript während der Auswertung

Abbildung 8.4: Ansicht auf dem Oszilloskop, vor (8.4 (a)), während (8.4 (b)) und nach der Versuchsdurchführung (8.4 (c))

8.4.2 Entwicklung: Python-Skript für die Datenvorbereitung und -bereinigung

Trotz der zahlreichen Vorteile einer Open-Source-Brille, wie Transparenz und Flexibilität bei Softwareanpassungen, ergeben sich auch wesentliche Herausforderungen. Da die Entwicklung und Wartung überwiegend durch freie Entwickler:innen in ihrer Freizeit und ohne kommerzielle Absichten erfolgt, können Dokumentationen unvollständig sein oder Programmteile Fehler (engl. *Bugs*) enthalten. Besonders die unstrukturierte Aufzeichnung der Rohdaten erfordert daher umfangreiche technische Kenntnisse, um sie für eine korrekte Analyse aufzubereiten. Zur Vereinfachung dieser Prozesse dient ein eigens entwickeltes

Python-Tool mit einer grafischen Nutzungsoberfläche, das die Datenaufbereitung, -bereinigung und -analyse unterstützt.

Das Tool ermöglicht zunächst die Unterteilung des Oszilloskop-AOIs in spezifische Sub-AOIs, indem verschiedene Formen gezeichnet und einzelnen Bereichen eindeutige Buchstaben zugeordnet werden: **A** für die Anzeige, **B** für die Vertikal-Regler (Empfindlichkeitseinstellung), **C** für die Triggerfunktionen, **D** für die Horizontal-Regler (Zeitbasis), **E** für die Messfunktion und **F** für alle übrigen Bereiche (vgl. Abb. 8.4 (c)). Jede Fixation – festgelegt als relative statische Augenposition von 200 ms (siehe Kapitel 8.3.2) – wird innerhalb eines AOIs durch den zugeordneten Buchstaben repräsentiert.

Durch die Aufzeichnung der Fixationsabfolge über die definierten AOIs entstehen Zeichenketten (engl. *Strings*), die den Scanpfad der Nutzer:innen widerspiegeln. Jede Fixation fügt dabei ein Zeichen an den bestehenden String an. Für die Analyse der Scanpfade sind jedoch vorrangig die Übergänge zwischen den AOIs relevant. Daher erfolgt im nächsten Schritt eine Vereinfachung des vollständigen Strings in einen zusammengefassten (engl. *collapsed string*), bei dem nur die Wechsel zwischen AOIs berücksichtigt werden. Neben der Generierung von Strings für die spätere Scanpfad-Analyse bietet das Python-Tool Visualisierungsmöglichkeiten in Form von *Heatmaps* und *AOI-Zeit-Diagrammen*. Die Heatmaps stellen die Häufigkeitsverteilung der Fixationen auf dem Oszilloskop dar, wobei länger fixierte Bereiche in Rot hervorgehoben sind⁴⁹. Das AOI-Zeit-Diagramm visualisiert hingegen die zeitliche Verteilung der Fixationen, indem jede Fixation als dünner Balken im jeweiligen AOI repräsentiert wird.

Das Flow-Diagramm in Abb. 8.5 veranschaulicht die einzelnen Schritte der Datenaufbereitung und -analyse. Es beginnt mit der Qualitätsprüfung der Messdaten, gefolgt von Korrekturmaßnahmen, der Berechnung von Fixationen und der Anwendung von Ähnlichkeitsalgorithmen zur Auswertung der Blickverläufe.

8.4.3 Teilnehmende der Studie

Wie in Kapitel 8.2 erläutert, erfolgt vor der Teilnahme an der Studie ein kurzes Interview zur Prüfung der Eignung der Proband:innen. Dabei ist unter anderem sichergestellt, dass keine Brille oder Kontaktlinsen getragen werden, da diese die Datenqualität erheblich beeinträchtigen. Durch diese Auswahlkriterien

⁴⁹ Ähnlich zu Wärmebildkameras, jedoch ohne feste Skala; die Farbverteilung erfolgt relativ zur Gesamtblickzeit.

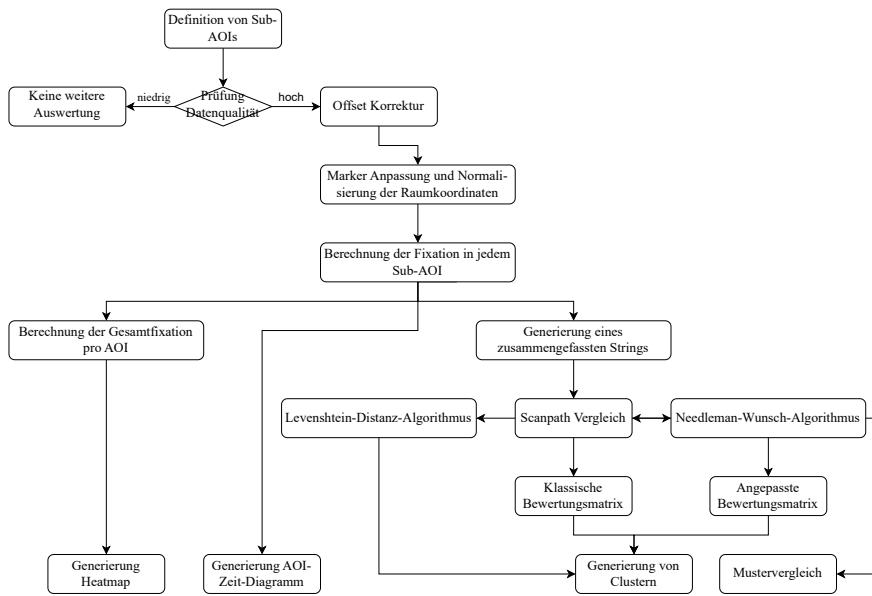


Abbildung 8.5: Flow-Diagramm mit den einzelnen Schritten der Datenaufbereitung und -analyse für jede teilnehmende Person

reduziert sich die Teilnehmerzahl von ursprünglich 23 auf 17. Trotz zusätzlicher Maßnahmen, wie einer Testmessung zur Offset-Korrektur, erweisen sich die Aufnahmen von sieben Teilnehmenden als qualitativ unzureichend für die Analyse. Hauptursachen sind übermäßige Kopfbewegungen sowie Make-up, insbesondere Mascara, was die Pupillenerkennung erschwert. Auch temporäre Beeinträchtigungen der Pupillenerfassung treten auf, häufig bedingt durch trockene Augen, die das Reflexionsverhalten des IR-Lichts verändern. Eine durchgehend sehr hohe Aufnahmefähigkeit liegt bei vier Proband:innen vor, während bei sechs Teilnehmenden während der Messungen zeitweise Aussetzer auftreten. Probanden mit häufigeren oder längeren Aufnahmeausfällen (Datenqualität ≤ 3) werden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

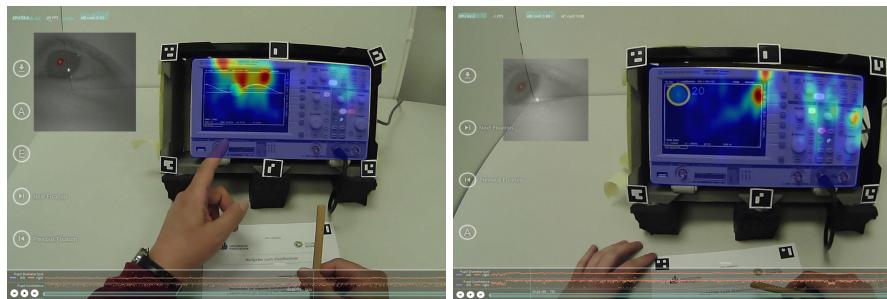
Für die finale Analyse stehen somit Daten von insgesamt zehn Personen zur Verfügung: drei Anfänger:innen, drei Fortgeschrittene und vier Experten. Tab. 8.6 gibt eine Übersicht über den Wissensstand der verbleibenden Teilnehmenden und deren Zuordnung in die jeweilige Erfahrungsgruppe.

ID	Wissensniveau	Zeit	Geschlecht	Alter	Beschäftigung	Datenqualität
S1	5	0:05:01	m	40	Laboringenieur	5
S3	5	0:05:02	m	38	Laboringenieur	4
S8	5	0:03:22	m	31	Laboringenieur	5
S9	5	0:04:49	m	34	Laboringenieur	4
S4	3	0:05:01	m	26	Student	4
S5	3	0:05:02	m	27	Student	4
S6	3	0:05:01	m	28	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	4
S2	1	0:05:02	f	20	Studentin	5
S7	1	0:05:05	m	22	Student	4
S10	1	0:05:02	f	19	Studentin	4

Abbildung 8.6: Verbleibende Teilnehmende für die Auswertung (4x Experten, 3x Fortgeschrittene, 3x Anfänger:innen)

8.4.4 Auswertung der Verweildauer — Heatmap

Die Analyse der Heatmaps zeigt, dass alle Proband:innen unabhängig von ihrem Erfahrungs niveau einen großen Teil der Betrachtungszeit auf den Oszilloskop-Bildschirm fokussieren (vgl. Abb. 8.7). Dies ist nachvollziehbar, da das Display rund 50 % der Geräteoberfläche einnimmt und sämtliche relevanten Änderungen sowie Bedienhandlungen dort visualisiert werden (siehe Abb. 8.4 (c)).



(a) Heatmap eines Experten (S1)

(b) Heatmap eines Anfängers (S7)

Abbildung 8.7: Heatmaps für zwei ausgewählte Proband:innen im Vergleich. Während Experten (hier: S1) eine längere Verweildauer auf dem Display des Oszilloskops zeigen (Abb. 8.7 (a)), richten Anfänger:innen (hier: S7) ihre Aufmerksamkeit verstärkt auf die Bedienelemente (Abb. 8.7 (b)).

Allerdings weisen Anfänger:innen auch eine stärkere Fixation auf die Bedienelemente auf, da sie das Oszilloskop zunächst kennenlernen und dessen Funktionen erkunden müssen (Abb. 8.7 (b)). Diese erhöhte Verweildauer deutet darauf hin, dass sie mehr Zeit benötigen, um sich mit der Steuerung vertraut zu machen, während die Experten aufgrund ihrer Vorerfahrung gezielter vorgehen. Bei ihnen dienen die Bedienelemente vorwiegend zur Orientierung, wodurch die Fixationen auf diesen Bereichen kürzer ausfallen (Abb. 8.7 (a)). Die Gesamtverweildauer auf dem Bildschirm bleibt bei Experten weitgehend konstant, während sie bei Anfänger:innen und bei Fortgeschrittenen von deren individuellen Lösungsstrategien abhängt. In Interviews beschreiben viele unerfahrene Nutzer:innen, dass insbesondere die leuchtenden Tasten ihre Aufmerksamkeit auf sich ziehen. Sie messen diesen eine hohe Bedeutung bei und versuchen deren Funktion nachzuvollziehen – ein Verhalten, das bei den Experten weniger ausgeprägt ist.

8.4.5 Auswertung der Fixationsfrequenz – AOI-Zeit-Diagramm

Das AOI-Zeit-Diagramm bietet eine detailliertere Analyse der Verweildauer als die Heatmaps, da es zeitliche Abläufe einbezieht und gleichzeitig die Fixationsfrequenz zwischen den AOIs erfasst. Auf den ersten Blick zeigen die Diagramme der verschiedenen Proband:innen-gruppen keine deutlichen Unterschiede (siehe Abb. 8.8). Durch die Verknüpfung der Blickdaten mit Interview- und Beobachtungsdaten lassen sich jedoch Zusammenhänge zu den angewandten Lösungsstrategien erkennen, wodurch bestimmte Muster identifiziert werden können.

Wie bereits die Heatmap-Analyse zeigt, richtet sich der Blick von Experten länger auf das Display, während die Bedienelemente nur kurz fixiert werden. Im AOI-Zeit-Diagramm äußert sich dies in einer hohen Fixationsfrequenz zwischen dem Display und den übrigen AOIs. Diese schnellen Fixationen dienen hauptsächlich der Orientierung, da die Bedienknöpfe und -regler bereits bekannt sind und sich der Fokus stärker auf die Lösung der Aufgabe richtet (siehe Teilnehmer S8 und S9 in Abb. 8.8). Besonders auffällig ist das Blickverhalten von Proband S8, das sich durch eine schnelle Aufgabenbewältigung und präzise Nutzung der Oszilloskop-Funktionen auszeichnet. In der Nachbefragung erklärte er, dass ihm das Oszilloskop-Modell zwar neu war, er sich jedoch aufgrund früherer Erfahrungen schnell an die Nutzungsoberfläche gewöhnt habe. Dies spiegelt sich in seinen Blickbewegungen wider, die nur selten auf die Funktionsbereiche des Oszilloskops gerichtet sind.

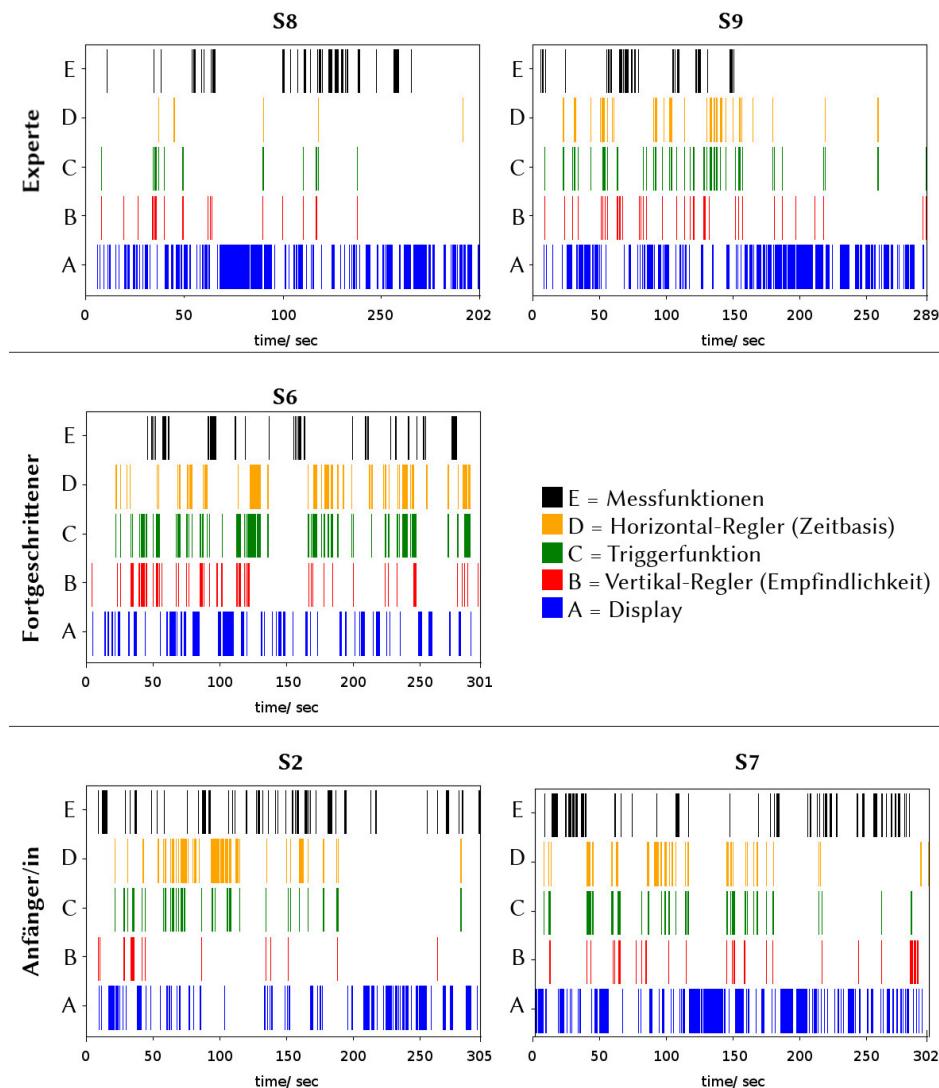


Abbildung 8.8: AOI-Zeit-Diagramm für einige ausgewählte Proband:innen pro Kategorie (Experte, Fortgeschritten, Anfänger:in)

Sowohl Studierende mit als auch ohne Vorerfahrung mit Oszilloskopen zeigen in einigen Fällen eine hohe Fixationsfrequenz. Allerdings fällt die Verweildauer

auf den verschiedenen AOIs bei unerfahrenen Nutzer:innen deutlich länger aus (siehe Teilnehmer S6 in Abb. 8.8). In der Forschung zum Leseverhalten werden längere Fixationen häufig als Indikator für Verständnisprobleme interpretiert (z. B. [Voß10]). übertragen auf die vorliegenden Daten könnte dies darauf hinweisen, dass unerfahrene Proband:innen mehr Zeit benötigen, um sich mit den Bedienelementen vertraut zu machen. Dies zeigt sich darin, dass sie bestimmte Regler fixieren, deren Einstellungen anpassen und anschließend die Auswirkungen auf dem Bildschirm beobachten.

Die Feedbackgespräche zu den Lösungsstrategien untermauern diese Annahme. So berichtet Probandin S2, gezielt nach Tasten oder Funktionen gesucht zu haben, die ihr aus Vorlesungen oder von anderen Geräten, etwa Taschenrechnern, bekannt sind. Teilnehmer S7 verfolgt hingegen eine unkonventionelle Strategie, indem er das Hilfemenü des Oszilloskops aufruft, um mögliche Lösungsansätze zu finden. Dies führt zu einer längeren Verweildauer auf dem Display und einem AOI-Zeit-Diagramm, das Ähnlichkeiten zu erfahreneren Proband:innen wie S9 aufweist. Unterschiedliche Lösungsstrategien können somit ähnliche Blickbewegungsmuster erzeugen, sowohl in Heatmaps als auch in AOI-Zeit-Diagrammen.

Da sich aus den reinen Eye-Tracking-Daten keine eindeutigen Merkmale zur Kategorisierung der Nutzergruppen ableiten lassen, rückt im weiteren Verlauf die Scanpfad-Analyse in den Fokus. Dabei werden verschiedene Algorithmen zur Ähnlichkeitsbewertung von Strings vorgestellt.

8.4.6 Auswertung der Scanpfade – Stringvergleich

Die Scanpfad-Analyse basiert auf Algorithmen, die Ähnlichkeiten oder Unterschiede zwischen Zeichenketten berechnen [Cas+18]. Ziel ist es, charakteristische Muster in den Blickbewegungen der Teilnehmenden zu identifizieren und mögliche Zusammenhänge mit ihrem Erfahrungs niveau herzustellen.

Levenshtein-Distanz-Algorithmus

Der *Levenshtein-Distanz-Algorithmus* ermittelt die minimale Anzahl erforderlicher Einfüge-, Lösch- und Ersetzungsoperationen, um eine Zeichenkette in eine andere zu überführen [Dew+12]. Indem für jede dieser Operationen spezifische Kosten festgelegt werden, lässt sich die Ähnlichkeitsbestimmung als ein Optimierungsproblem (Kostenminimalproblem) formulieren und mathematisch lösen. Geringere Kosten (bzw. kürzere Distanzen) deuten dabei auf eine höhere Ähnlichkeit zwischen den beiden Zeichenketten hin [Dew+12].

Die berechneten Distanzen dienen als Grundlage für ein hierarchisches Clustering der Proband:innen (siehe Abb. 8.9 (a)). Je ähnlicher sich zwei Scanpfade sind, desto kürzer sind die Verzweigungen im resultierenden Diagramm. Beispielsweise gruppieren sich die Proband:innen S8 und S5 in Cluster C1, während S1 und S6 sich als C2 zusammenfassen lassen. Diese Cluster werden anschließend zu höheren Clustern (hier C3) zusammengeführt, bis eine vollständige Hierarchie entsteht. Allerdings liefert die Clusteranalyse auf Basis dieses Algorithmus keine eindeutigen Ergebnisse, da sich auch Proband:innen aus der Expertengruppe in den Verzweigungen der Fortgeschrittenen wiederfinden, etwa S1 und S8 (siehe Abb. 8.9 (a)).

Needleman-Wunsch-Algorithmus

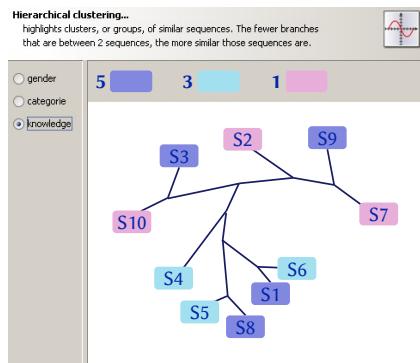
Im Gegensatz zum Levenshtein-Algorithmus, der die Differenz zwischen zwei Zeichenketten berechnet und dabei kleinere Werte auf eine größere Ähnlichkeit hinweisen, handelt es sich beim *Needleman-Wunsch-Algorithmus* um eine Methode zur Ähnlichkeitsbewertung. Eine höhere Übereinstimmung zweier Strings resultiert daher in einem höheren Wert [Cas+18]. Der Algorithmus basiert auf dem sogenannten *Sequenz-Alignment*, bei dem zwei Zeichenfolgen durch das Einfügen von Lücken (engl. *gap*) so ausgerichtet werden, dass möglichst viele gleiche Abschnitte bzw. Teilzeichenfolgen entstehen [Cas+18; Dew+12].

Zur Bewertung der Übereinstimmung wird eine Ähnlichkeitsmatrix (engl. *Alignment- oder Similarity-Score*) definiert, die das Problem analog zum Levenshtein-Distanz-Algorithmus als Kostenminimalproblem formuliert [Cas+18]. In dem klassischen Verfahren werden gleiche Buchstaben (engl. *match*) mit **+1** bewertet und Lücken sowie Fehlanpassungen (engl. *mismatch*) führen zu einem Abzug von **-1** [Hel18].

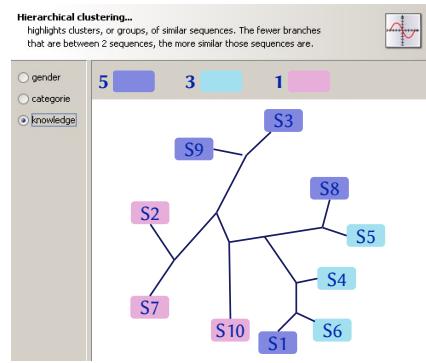
Das folgende Beispiel verdeutlicht die Funktionsweise des Algorithmus anhand der Zeichenketten „BIERGARTEN“ und „STERNWARTE“. Mit der zuvor festgelegten Bewertung und durch das Einfügen von drei Gaps ergibt sich eine maximale Punktzahl von 3, basierend auf 6 Matches, 0 Mismatches und 3 Gaps⁵⁰.

E	R	N	W	-	A	R	T	E	(2...9)
E	R	-	-	G	A	R	T	E	(2...8)

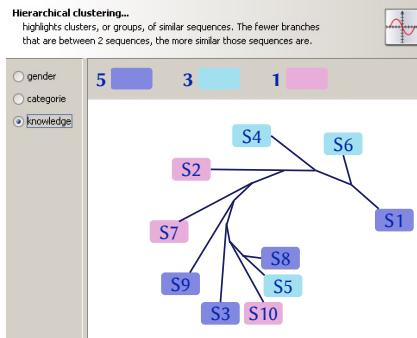
⁵⁰ Gaps zu Beginn der Zeichenkette werden nicht berechnet



(a) Clustering nach dem Levenshtein-Distanz-Algorithmus



(b) Clustering nach dem Needleman-Wunsch-Algorithmus mit klassischer Bewertungsmatrix



(c) Clustering nach dem Needleman-Wunsch-Algorithmus mit angepasster Bewertungsmatrix

Abbildung 8.9: Vergleich verschiedener Algorithmen zur Ähnlichkeitsbestimmung: 8.9 (a) Levenshtein-Distanz-Algorithmus sowie Needleman-Wunsch-Algorithmus mit klassischer (8.9 (b)) und angepasster Bewertungsmatrix (8.9 (c)).

Das Clustering nach diesem Algorithmus liefert – ähnlich wie der Levenshtein-Distanz-Algorithmus – kein eindeutiges Ergebnis (vgl. Abb. 8.9 (b)). Zwar sind Anfänger:innen insgesamt besser gruppiert, dennoch werden auch hier die Proband:innen S8 und S1 (Experten) fälschlicherweise dem Cluster der Fortgeschrittenen zugeordnet. Auffällige Besonderheiten in den Daten lassen sich ebenfalls nicht identifizieren.

Needleman-Wunsch-Algorithmus mit eigener Bewertungsmatrix

Da der klassische Needleman-Wunsch-Algorithmus ebenfalls kein klares Ergebnis liefert, wird er mit einer angepassten Bewertungsmatrix wiederholt. Bewertungsmatrizen ermöglichen eine präzisere Abbildung semantischer Ähnlichkeiten zwischen den AOIs und sollen dadurch eine genauere Clusterbildung erzielen.

Die Regionen B und D weisen eine enge funktionale Verwandtschaft auf, da beide der Skalierung und Verschiebung des Signals dienen. Daher bleibt die Ersetzung zwischen diesen Bereichen kostenneutral. Der Trigger-Bereich (C) übernimmt ebenfalls eine wichtige Rolle in der Signaldarstellung, weshalb er in die gleiche Gruppe eingeordnet wird. Bereich E hingegen ist für spezifische Messfunktionen und weiterführende Analysen wie die Schnelle Fourier-Transformation (engl. *Fast Fourier Transform (FFT)*) vorgesehen. Deshalb erhält eine Ersetzung zu oder von E höhere Kosten, während das Hinzufügen eines Gaps wie zuvor auch mit **-1** bestraft wird.

Die AOIs B bis E zeigen untereinander größere Ähnlichkeiten als zum Bereich A (Display), da sie verschiedene Bedienelemente repräsentieren. Dies spiegelt sich in höheren Ersetzungskosten wider. Die Bewertungsmatrix ist in *Tabelle (Tab.) 8.1* dargestellt.

Tabelle 8.1: Eigene Bewertungsmatrix zur Anwendung mit dem Needleman-Wunsch-Algorithmus.

	A	B	C	D	E	*
A	1	-3	-3	-3	-3	-1
B	-3	1	-1	0	-2	-1
C	-3	-1	1	-1	-2	-1
D	-3	0	-1	1	-2	-1
E	-3	-2	-2	-2	1	-1
*	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Das Clustering zeigt eine ähnliche Gruppierung wie der klassische Algorithmus. Die Proband:innen S8 und S5 sowie S1 und S6 bilden erneut gemeinsame Cluster. Allerdings fällt die Trennschärfe zwischen Experten und Noviz:innen geringer aus; der Experte S9 liegt näher an den Noviz:innen S7 und S2 als an S3, einem weiteren Experten (siehe Abb. 8.9 (c)).

Mustervergleich innerhalb der Gruppen und Proband:innen

Der Needleman-Wunsch-Algorithmus ermöglicht durch das Ausrichten verschiedener Sequenzen (Sequenzabgleich) die Identifikation gemeinsamer Teilstings, um charakteristische Muster innerhalb der Gruppen zu analysieren (engl. *pattern matching*). Dabei kommen reguläre Ausdrücke zum Einsatz, mit denen sich komplexe Suchmuster definieren lassen. Diese bestehen aus einer Kombination von Zeichen und speziellen Symbolen wie „*“, „?“ oder „^“, wodurch erweiterte Suchfunktionen möglich sind [Zor20]. Beispielsweise trifft der Ausdruck „AB*“ sowohl auf „A“, „AB“ als auch auf „ABBBB“ zu.

Tabelle 8.2: Ergebnisse des Pattern Matching in jeder Gruppe sowie insgesamt unter allen Teilnehmenden

Anfänger:innen			Fortgeschrittene		
Muster	Absolute Häufigkeit	Sequenz-Abdeckung ⁵¹	Muster	Absolute Häufigkeit	Sequenz-Abdeckung
CDCDCDCDCD	3867	3/3	BCBCBCBC	5282	3/3
DCDCDCDCDC	3776	3/3	CBCBCBCB	5185	3/3
BCBCBCBC	2559	3/3	CDCDCDCDCD	4622	3/3
CBCBCBCB	2516	3/3	DCDCDCDCDC	4547	3/3
BCDCDCDCDC	60	3/3	BCDCDCDC	54	3/3
DCDCDCDCDB	54	3/3	DCDCDCDCDB	53	3/3
CDCDCDCDBC	53	3/3	CBCBCBCD	52	3/3

Experten			Alle		
Muster	Absolute Häufigkeit	Sequenz-Abdeckung	Muster	Absolute Häufigkeit	Sequenz-Abdeckung
CDCDCDCDCD	4982	4/4	CDCDCDCDCD	13471	10/10

Die Ergebnisse in Tab. 8.2 zeigen, dass die Muster „CDCDCDCDCD“ und „CBCBCBCBC“ in allen Sequenzen besonders häufig vorkommen. Dies weist auf eine intensive Betrachtungsfrequenz der AOIs B, C und D hin. Zudem treten das horizontale Menü (D) und das vertikale Menü (B) häufig in Kombination mit dem Triggermenü (C) auf. Die Reihenfolge der Betrachtung scheint dabei weniger relevant zu sein als die Wechsel zwischen diesen Funktionsbereichen insgesamt. Eine eindeutige Ursache für dieses Verhalten lässt sich nicht ableiten. Da die Genauigkeit des Eye-Trackers begrenzt ist, kann es zu Abweichungen von einigen Zentimetern im eigentlichen Betrachtungspunkt kommen, was sich besonders stark bei AOIs mit geringer Größe bemerkbar macht. Auch der Einfluss der individuellen Lösungsstrategie bleibt unklar, da die erkannten Muster nur für sehr kurze Zeit bestehen und teilweise weniger als eine Sekunde andauern.

⁵¹ Gibt an, in wie vielen der analysierten Sequenzen das Muster gefunden wird

8.5 Zusammenfassung und Reflexion

8.5.1 Zusammenfassung

Eye-Tracking hat sich sowohl in der Industrie als auch in der Forschung als Analysewerkzeug etabliert, um Blickverläufe und kognitive Prozesse besser zu verstehen. Es basiert auf der Eye-Mind-Hypothese, die besagt, dass Fixationsmuster Rückschlüsse auf kognitive Prozesse ermöglichen und die Fixationsdauer die Verarbeitungszeit eines Objekts widerspiegelt. Dieses Research Pentagon untersucht, ob sich kognitive Prozesse beim Umgang mit Oszilloskopen quantitativ und objektiv erfassen lassen. Dazu wird das Blickverhalten von Anfänger:innen, Fortgeschrittenen und Expert:innen mittels eines Open-Source und Open-Hardware Eye-Trackers erfasst und verglichen. Die Zuteilung der Teilnehmenden zu den Gruppen basiert auf einer Selbsteinschätzung sowie einem Prä-Interview.

Während des fünfminütigen Tests am Oszilloskop erfolgen die Aufzeichnung der Blickverläufe und Dokumentation von Auffälligkeiten, ergänzt durch ein abschließendes, formloses Feedbackgespräch, das zusätzliche Informationen zu den Lösungsstrategien liefert. Zur Auswertung kommt ein eigens in Python entwickeltes Tool zum Einsatz, das die Bereinigung und Strukturierung der Messdaten ermöglicht. Dabei wird das AOI des Oszilloskops in kleinere Sub-AOIs aufgeteilt und mit Buchstaben codiert. Diese werden dann mithilfe der Metriken Fixationsdauer, Fixationshäufigkeit und Blickpfade ausgewertet (Forschungsfrage F2).

Zur konkreten Beantwortung der Forschungsfrage F3 hinsichtlich der Unterschiede im Blickverhalten zwischen Experten und Anfänger:innen bei der Nutzung des Oszilloskops werden die Metriken aus F2 ausgewertet.

Die Fixationsdauer – visualisiert in Heatmaps – zeigt, dass Experten eine vergleichsweise lange Verweildauer auf dem Bildschirm aufweisen, während Anfänger:innen zusätzlich einzelne Bedienelemente über längere Zeiträume betrachten, um deren Funktion zu verstehen. Insbesondere beleuchtete Tasten beeinflussen die Aufmerksamkeit stark, wie aus den Nachgesprächen hervorgeht, und führen dadurch zu längeren Fixationen auf bestimmten Reglern.

Auch die Fixationsfrequenz-Analyse mittels AOI-Zeit-Diagrammen bestätigt diese Beobachtung. Die Experten zeigen kurze, schnelle Blickbewegungen zwischen Bedienelementen und Display, während Anfänger:innen längere Fixationszeiten auf den jeweiligen Bereichen aufweisen.

Dies legt nahe, dass Experten bereits eine mentale Repräsentation des Geräts besitzen und sich schneller eine Orientierung am Oszilloskop verschaffen können. Anfänger:innen erkunden die Bedienelemente intensiver, durch längere Fixationen und geringere Fixationsfrequenzen, um deren Funktion mit vorhandenem Vorwissen zu verknüpfen, beispielsweise aus der Nutzung von Taschenrechnern.

Jedoch hängt das Ergebnis stark von der individuellen Lösungsstrategie ab, weshalb eine Verallgemeinerung nur eingeschränkt möglich ist. Beispielsweise ruft ein Anfänger, der das Hilfsmenü nutzt, ebenfalls lange Verweildauern auf dem Display auf und zeigt gleichzeitig sehr kurze Fixationsfrequenzen.

Die Scanpfad-Analyse mithilfe von Ähnlichkeitsalgorithmen verdeutlicht ebenfalls, dass eine eindeutige Abgrenzung der Erfahrungsstufen nicht möglich ist. Die Clusterbildung nach Levenshtein- und Needleman-Wunsch-Algorithmus – sowohl mit klassischer als auch mit angepasster Bewertungsmatrix – ergibt gemischte Gruppen, in denen sich alle drei Erfahrungsstufen überschneiden. Die Blickverläufe innerhalb einzelner Personen über mehrere Durchgänge hinweg zeigen eine stärkere Variabilität als zwischen verschiedenen Erfahrungsgruppen. Dies legt nahe, dass sich Lösungsstrategien individuell entwickeln und nicht zwingend einem einheitlichen Muster folgen.

Damit lässt sich die zentrale Forschungsfrage **F1** und in Folge auch **F4** beantworten: Trotz erkennbarer Unterschiede im Blickverhalten lassen sich aus den reinen Eye-Tracking-Daten keine eindeutigen Klassifikationen ableiten. Eine objektive Bewertung von kognitiven Prozessen beim Umgang mit Laborgeräten ist folglich nach dieser Studie nicht möglich. Eine zuverlässige Unterscheidung der Erfahrungsgruppen erfordert die Kombination mit qualitativen Methoden, etwa durch Interviews oder das Laute Denken.

8.5.2 Reflexion: Störvariablen

Die Aussagekraft der Ergebnisse dieser Eye-Tracking-Studie ist durch verschiedene methodische und technische Herausforderungen deutlich eingeschränkt. Bereits die grundlegenden Annahmen durch die Eye-Mind-Hypothese müssen kritisch berücksichtigt werden, da beispielsweise eine längere Fixationsdauer nicht zwangsläufig mit kognitiver Auseinandersetzung verbunden ist, sondern ebenso auf gedankliches Abschweifen hinweisen kann.

Ein wesentliches methodisches Problem dieser Studie ist der *Hawthorne-Effekt*, bei dem sich Teilnehmende, sobald sie sich ihrer Rolle in einer Studie bewusst

sind, nicht mehr „*natürlich*“ verhalten [Bla13; Kom+08; SG15]. Die Teilnehmenden können Annahmen über die Forschungshypothese treffen und sich entsprechend verhalten [DB16]. Das Tragen der Eye-Tracking-Brille verstärkt diesen Effekt, da das ungewohnte Tragegefühl die Proband:innen ständig daran erinnert, Teil eines Versuchs zu sein [DB16]. Um dem entgegenzuwirken, erhalten die Teilnehmenden erst am Ende der Studie detaillierte Informationen über die tatsächliche Zielsetzung der Untersuchung.

Die Größe der AOIs stellt ebenfalls ein kritisches Kriterium dar. Sind diese zu klein dimensioniert, können bereits leichte Abweichungen der Blickposition oder sprunghafte Fixationswechsel zu ungewollten Messfehlern führen. Dies beeinträchtigt insbesondere die Analyse von Fixationsfrequenzen und Scanpfaden, bei denen eine präzise und zuverlässige Zuordnung der Fixationen zu AOIs maßgeblich ist.

Darüber hinaus treten mehrere Probleme im Kontext der technischen Datenerfassung auf. Kopfbewegungen, vorwiegend die Annäherung an das Oszilloskop bei konzentrierter Arbeit, führen zu sogenannten *Parallaxenfehlern*. Diese entstehen, weil der Eye-Tracker nur in der kalibrierten Entfernung zum Untersuchungsgegenstand exakt ist und jede Abweichung von dieser Position die Genauigkeit der Fixationsmessung verringert [Duc07; HNM12]. Trotz vorheriger Instruktionen lassen sich diese Bewegungen während des Experiments nicht vollständig vermeiden, insbesondere wenn die Proband:innen völlig in der Aufgabe vertieft sind. Außerdem bewirkt die konzentrierte Arbeit eine reduzierte Lidschlagfrequenz, was wiederum eine Austrocknung der Augen bewirkt [SBS94]. Die daraus resultierende Trockenheit beeinträchtigt die Reflexionsqualität des IR-Lichts auf der Pupille und verursacht temporäre Messausfälle, sodass Lücken in den Scanpfaden entstehen. Zudem verursacht eine zeitweise reduzierte Bildrate des Eye-Trackers während der Aufnahme ebenfalls den Verlust von wichtigen Blickdaten. Bereits Ausfälle von einigen Sekunden führen bei Fixationszeiten von 300 ms zu erheblichen Datenverlusten.

Diese technischen Einschränkungen reduzieren die ohnehin geringe Stichprobe, sodass letztlich nur etwa die Hälfte der Teilnehmenden für die weitere Analyse genutzt werden kann. In Folge sind keine allgemeingültigen Aussagen über Unterschiede zwischen Anfänger:innen, Fortgeschrittenen und Experten möglich. Um valide Ergebnisse zu erzielen, sind verbesserte experimentelle Bedingungen und technische Lösungen erforderlich, etwa modernere Eye-Tracker mit höherer Messpräzision und stabilerer Datenerfassung. Neuere Generationen

von Pupil Labs Eye-Trackern versprechen genauere Messungen ohne vorherige Kalibrierung und selbst unter freiem Himmel. Zudem erlauben sie die Erfassung weiterer Metriken, wie die Pupillendilatation oder Blinzelrate. Diese ergänzenden Parameter könnten tiefere Einblicke in kognitive Prozesse ermöglichen, da beispielsweise die Blinzelrate von der Schwierigkeit einer Aufgabe und der damit verbundenen mentalen Beanspruchung abhängt (z. B. [BWS96]). Ebenso gilt die Pupillendilatation als zuverlässiger Indikator für die mentale Belastung oder Ermüdung der Proband:innen (z. B. [SBS94], [HL93] oder [Wie+12]).

Auch existieren Eye-Tracking-Module, die sich direkt in VR- und MR-Brillen integrieren lassen und somit Blickdaten unmittelbar erfassen. Verschiedene aktuelle MR-Brillen, beispielsweise die Holo Lens 2 von Microsoft, die Meta Quest 2 Pro oder die Apple Vision, verfügen bereits über integrierte Eye-Tracking-Systeme, die präzisere Daten liefern können als eigenständige Lösungen. Dadurch eignet sich Eye-Tracking besonders gut für zukünftige Studien, in denen die MR-Version der App genutzt wird, da keine zusätzlichen Messgeräte benötigt werden und die Studie einfacher und kostengünstiger skalierbar ist.

Abschnitt III - Summative Evaluation

9

Wirksamkeitsanalyse der mobilen AR-App

Wie im vorangehenden Kapitel festgestellt, ist Eye-Tracking als Messinstrument aufgrund der begrenzten Aussagekraft und Generalisierbarkeit für die Gesamtevaluation der Lehrmaßnahme ungeeignet. Daher wird in diesem Kapitel ein Online-Test als alternative und in der Praxis etablierte Evaluationsmethode eingeführt. Zwar weist auch dieser Ansatz Einschränkungen auf, insbesondere hinsichtlich der Erfassung der kognitiven Handlungsregulation bei der gezielten Bedienung eines Laborgeräts. Jedoch lassen sich in Kombination mit einem ergänzenden Fragebogen zur Messung affektiver Veränderungen unterschiedliche Wirksamkeitsaspekte zur Vorbereitung auf Elektrotechnik-Laborpraktika zuverlässig bewerten [WSO22].

Während der Online-Test die verschiedenen Taxonomiestufen nach Bloom fokussiert, erhebt der Fragebogen das *experimentelle (exp.)* Selbstkonzept, das Interesse an experimentellen Fragestellungen sowie das Empfinden von Überforderung im Vorfeld der Experimente. Im Mittelpunkt steht dabei weniger die Entwicklung des Messinstruments selbst, sondern vielmehr die Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Gesamtevaluation.

Analog zum Research Pentagon werden zunächst die Forschungsfragen formuliert und daraus die Forschungshypothese zur Gesamtevaluation der App abgeleitet (Kapitel 9.1). In Kapitel 9.2 erfolgt anschließend die Beschreibung des Forschungsdesigns. Eine zentrale Rolle spielen dabei die eingesetzten Materialien (Kapitel 9.3), differenziert nach Messinstrumenten und Interventionen, sowie die statistische Auswertung der erhobenen Daten (Kapitel 9.4). Abschließend folgt eine zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse.

9.1 Forschungsfragen und Hypothesen

Im Rahmen der Gesamtevaluation stehen folgende Forschungsfragen im Mittelpunkt:

- **F1:** Welchen Einfluss hat die Nutzung der AR-App auf die kognitiven Aspekte, wie Wissen, Verständnis, Analyse und Anwendung in Bezug auf Oszilloskope?
- **F2:** Lassen sich diese kognitiven Aspekte mittels der AR-App besser vermitteln als durch herkömmliche Vorbereitungsmaterialien, wie Skripte, Videos oder Handbücher?
- **F3:** Welchen Einfluss hat die Nutzung der AR-App auf die affektiven Merkmale, wie das exp. Selbstkonzept, das exp. Sachinteresse sowie die empfundene Überforderung oder Ängstlichkeit vor Laborversuchen?
- **F4:** Lässt sich die Selbsteinschätzung dieser affektiven Merkmale der Studierenden mittels der AR-App im Vergleich zu herkömmlichen Vorbereitungsmaterialien verbessern?

Aus den Forschungsfragen ergeben sich vier Hypothesen mit zugehörigen Unterhypothesen. Während Hypothese H1 und H3 zeitliche Veränderungen zwischen den beiden Erhebungszeitpunkten (Prä-Post-Vergleich) untersuchen, vergleichen H2 und H4 Gruppenunterschiede im Zeitverlauf. Die Hypothesen H1 und H2 beziehen sich auf kognitive Fähigkeiten im Umgang mit dem Oszilloskop, dagegen nehmen H3 und H4 affektive Merkmale der Studierenden in den Fokus:

- **H1:** Im Zeitverlauf verbessert sich das kognitive Leistungsniveau der Studierenden signifikant durch die Nutzung der AR-App, sowohl im Bereich von Wissen und Verständnis (**H1.1**) als auch hinsichtlich Analyse- und Anwendungsfähigkeiten (**H1.2**).
- **H2:** Im Vergleich zur Kontrollgruppe (klassische Materialien) erzielen Studierende der Interventionsgruppe nach Nutzung der AR-App signifikant höhere kognitive Leistungen, bezogen auf Wissen und Verständnis (**H2.1**) sowie auf Analyse und Anwendung (**H2.2**).

- **H3:** Die Nutzung der AR-App führt über die Zeit hinweg zu signifikanten positiven Veränderungen affektiver Merkmale bezogen auf das exp. Selbstkonzept (**H3.1**), das exp. Sachinteresse (**H3.2**) sowie das Empfinden von Überforderung und Ängstlichkeit (**H3.3**).
- **H4:** Im Vergleich zur Kontrollgruppe zeigen Studierende der Interventionsgruppe nach der Nutzung der AR-App signifikant positivere Ausprägungen affektiver Merkmale, d. h. ein höheres exp. Selbstkonzept (**H4.1**), ein stärkeres exp. Sachinteresse (**H4.2**) sowie eine geringere empfundene Überforderung und Ängstlichkeit (**H4.3**).

Aus diesen Hypothesen wiederum lassen sich die unabhängigen (UV) und abhängigen Variablen (AV) festlegen.

Die unabhängigen Variablen umfassen Faktoren, die in der Studie gezielt kontrolliert oder manipuliert werden können; in diesem Fall betrifft dies die Gruppenzugehörigkeit der Teilnehmenden, die entweder der KG oder der *Interventionsgruppe (IG)* zugewiesen sind. Demgegenüber erfassen die abhängigen Variablen die Auswirkungen der unabhängigen Variablen und dienen zur Analyse ihrer Einflussnahme. Sie betreffen sowohl kognitive Leistungsstufen nach der Bloom'schen Taxonomie, darunter Wissen, Verständnis, analytische Fähigkeiten und die Anwendung von Oszilloskopen, als auch affektive Einstellungen wie das empfundene Maß an Überforderung und Ängstlichkeit im Praktikum, das exp. Selbstkonzept und das exp. Sachinteresse. Zusätzlich existieren weitere unabhängige Variablen, die potenziell Einfluss auf die Studienergebnisse haben. Dazu zählen das Vorwissen der Teilnehmenden, der zeitliche Aufwand für die Vorbereitung auf das Praktikum, frühere Erfahrungen mit AR sowie die allgemeine technische Affinität.

9.2 Forschungsdesign

Die Forschungsstudie folgt einem Prä-Post-Test-Design mit einem Kontrollgruppenvergleich, wie in Abb. 9.1 dargestellt.

Die Studie wird im Mai 2023 mit Elektrotechnik-Studierenden an der *Technische Universität Dortmund (TU-DO)* und der *Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH)* durchgeführt. Vorab erhalten die Studierenden per E-Mail eine Einladung zur Teilnahme an einem Online-Prä-Test über das jeweilige *Learning Management System (LMS)*⁵² der Universitäten. Zusätzlich werden

52 in beiden Fällen Moodle

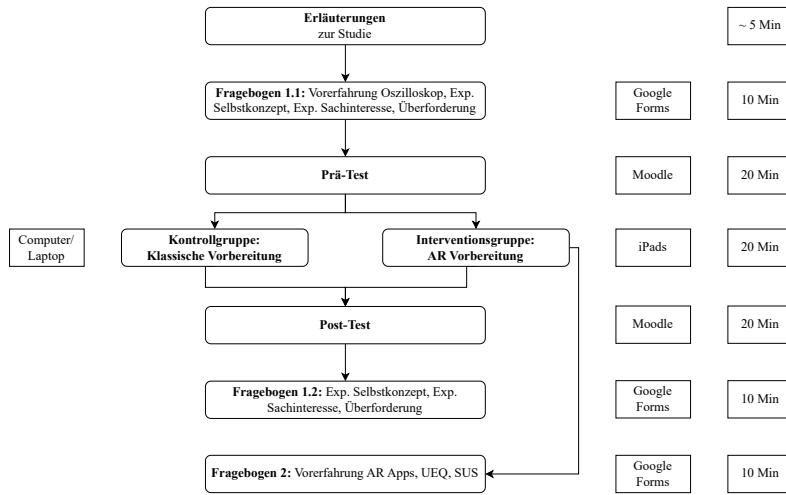


Abbildung 9.1: Forschungsdesign mit einem Prä-Post-Test-Design und einem Kontrollgruppenvergleich

sie gebeten, einen 15-minütigen Online-Fragebogen auszufüllen. Dieser erhebt neben soziodemografischen Daten auch Vorerfahrungen mit Laborgeräten, Einstellungen zum Experimentieren sowie technische und exp. Selbstkonzepte der Teilnehmenden.

Nach etwa einer Woche folgt die Intervention. Die Studierenden werden zufällig in eine Interventionsgruppe und eine Kontrollgruppe aufgeteilt. Beide Gruppen haben 30 min Zeit, sich mit den bereitgestellten Vorbereitungsmaterialien mit dem Oszilloskop vertraut zu machen. Während die Kontrollgruppe klassische Materialien wie Handbücher, Skripte und Videos zum Oszilloskop R&D HMO1002 nutzt, arbeitet die Interventionsgruppe mit der AR-App in der Version 0.17.07.

Im Anschluss absolvieren alle Teilnehmenden einen zum Prä-Test identisch aufgebauten Post-Test und beantworten eine verkürzte Version des Fragebogens zu affektiven Einstellungen. Die Interventionsgruppe erhält zusätzlich einen weiteren Fragebogen zur Bewertung der Benutzungsfreundlichkeit mittels des *System Usability Scale (SUS)* und der Nutzererfahrung über den UEQ.

9.3 Verwendete Materialien

9.3.1 Messinstrumente

Wissens-Test zum Oszilloskop

Der Moodle-Kurs besteht aus einer Fragensammlung mit 21 Aufgaben zum Oszilloskop. Die ursprüngliche Version ist im April 2022 mit Elektrotechnik-Studierenden und im August desselben Jahres mit Physik-Studierenden der Universität Paderborn pilotiert worden. Auf Basis von Gesprächen mit Mitarbeitenden und Laboringenieuren aus den Fachbereichen Elektrotechnik und Physik ist der Test weiter präzisiert und optimiert worden. Die Fragen unterteilen sich in sieben Aufgaben zum allgemeinen Verständnis von Signalen und Oszilloskopen, darunter die Benennung einzelner Bedienelemente. Sechs weitere Fragen thematisieren die Zeitbasis, ebenso sechs Fragen die Empfindlichkeit. Ergänzend existiert eine Aufgabe, die beide Kategorien kombiniert, sowie eine weitere Aufgabe zur Funktion des Triggers. Eine detaillierte Darstellung der Fragen findet sich im Anhang S. [XXXIII](#).

Fragebögen

In der Studie kommen zwei ähnliche Fragebögen mit identischer Struktur zum Einsatz. Beide beginnen mit einem Abschnitt zur Ermittlung allgemeiner Daten, die potenziell die Studienergebnisse beeinflussen können, gefolgt von standardisierten Frage-Blöcken.

Fragebogen 1: Vorerfahrung, Selbstkonzept und Überforderung

Der erste Fragebogen stellt neben den soziodemografischen Angaben, insbesondere Fragen zu den Vorerfahrungen der Studierenden im Umgang mit Laborgeräten und experimentellen Tätigkeiten. Im zweiten Abschnitt folgen acht Items zum exp. Selbstkonzept sowie drei Items zum exp. Sachinteresse. Der letzte Abschnitt enthält 14 Items zur Erfassung von Überforderung und Ängstlichkeit vor Laborversuchen. Dieser Fragebogen, mit Ausnahme des ersten Abschnitts, wird von den Teilnehmenden analog zum Moodle-Test sowohl vor als auch nach der Intervention ausgefüllt.

Fragebogen 2: System Usability Scale und User Experience Questionnaire

Der zweite Fragebogen richtet sich ausschließlich an die Interventionsgruppe, die mithilfe von iPads und der AR-App die Laborgeräte erkundet. Nach allgemeinen Fragen zur Nutzungshäufigkeit von Smartphones oder Tablets sowie zur Vorerfahrung mit AR-Anwendungen folgen zwei etablierte, standardisierte Fragebögen: der System Usability Scale und der User Experience Questionnaire.

Die zehn Items des SUS ergeben nach Gewichtung einen Gesamtwert zur Bewertung der Benutzungsfreundlichkeit der App. Außerdem lässt sich durch den Vergleich mit anderen Studien, die ebenfalls den SUS einsetzen, die Gesamtperformance der Anwendung beurteilen. Der UEq besteht aus 26 Items, die jeweils Gegensatzpaare darstellen (siehe Kapitel 7.4.1). Den Abschluss des Fragebogens bilden 11 offene Fragen, in denen die Teilnehmenden Verbesserungsvorschläge äußern können. Beispielsweise werden Fragen wie „Was hat Dir gefehlt?“ oder „Was könnte man noch anders oder besser machen?“ gestellt. Beide Fragebögen sind im Anhang unter III.2 ab S. XLIII dieser Arbeit vollständig dokumentiert.

9.3.2 Intervention

AR-App – PEARL

Um sicherzustellen, dass Unterschiede in der Hardwareleistung oder Softwareversion keinen Einfluss auf die Nutzung der AR-App haben, erhalten die Teilnehmenden der Interventionsgruppe iOS-Tablets. Zum Einsatz kommt ein iPad-Modell aus dem Jahr 2018 mit iOS-Version 14.1 und der AR-App in Version 0.17.07.

Die App integriert sämtliche Optimierungen, die aus der Reflexion der Onboarding-Studie hervorgegangen sind. Anstatt alle Funktionen eigenständig durch Ausprobieren zu entdecken, führt das Onboarding schrittweise und gezielt durch die wesentlichen Level und Funktionen der App. Nach Abschluss dieser Einführung können die Studierenden sämtliche App-Funktionen frei erkunden.



(a) Verschiedene Messfunktionen des Oszilloskops, um Signalparameter wie Frequenz oder Amplitude zu bestimmen

(b) 2D-Ansicht der App mit weiteren Geräten, u. a. Steckbrett und elektrotechnischen Bauteilen

Abbildung 9.2: Ansicht aus dem Funktions- und Geräteumfang der App in Version 0.17.07

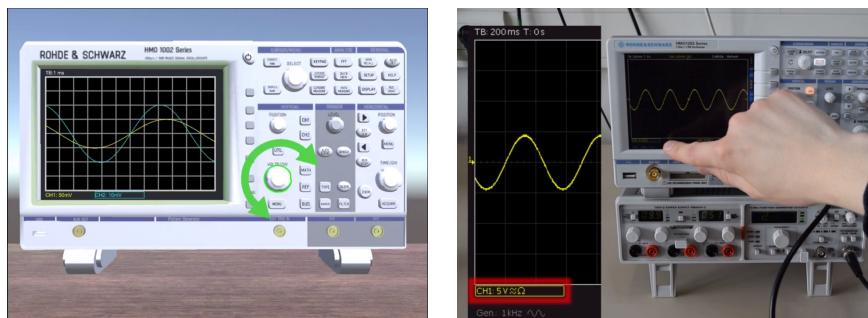
Neben einem erweiterten Funktionsumfang des Oszilloskops, das nun verschiedene integrierte Messfunktionen wie „Time“, „Voltage“ und „Set to Trace“ beinhaltet (siehe Abb. 9.2 (a)), ist auch das Trigger-Menü um Optionen wie „Edge“, „Channel 1“ und „Channel 2“ ergänzt. Darüber hinaus stehen zusätzliche Geräte zur Verfügung, darunter ein Steckbrett mit elektrotechnischen Bauteilen wie Widerständen, *Light Emitting Diode (LEDS)*, Spulen und Kondensatoren (siehe Abb. 9.2 (b)). Ergänzt wird das Set-up durch ein Vielfachmessgerät sowie ein Netzteil, das direkt im Funktionsgenerator integriert ist.

Eine weitere Neuerung ist die 2D-Ansicht, die ein längeres und komfortableres Arbeiten und Experimentieren mit der App ermöglicht.

Digitale Unterlagen in Moodle

Die Teilnehmenden der Kontrollgruppe erhalten vorab über die Moodle-Plattform die Anweisung, zum zweiten Testtermin einen eigenen Laptop oder ein Tablet sowie Kopfhörer mitzubringen, um die bereitgestellten Vorbereitungsmaterialien nutzen zu können. Die Untersuchung findet in den Computer-Poolräumen der jeweiligen Universitäten statt, sodass bei Bedarf auch universitäres Equipment zur Verfügung steht.

Die Materialien umfassen ein aus der AR-App generiertes Video, das den Einführungslevel zeigt und die zentralen Funktionen des Oszilloskops erläutert (siehe Abb. 9.3 (a)). Ergänzend liegt ein weiteres, aufwendig aufbereitetes Erklärvideo des E-Labors vor, das am realen Oszilloskop aufgenommen ist und inhaltlich dieselben Themen behandelt wie die AR-Anwendung (siehe Abb. 9.3 (b)).



(a) Bildschirmfoto aus dem Erklärvideo – aufgezeichnet aus der AR-App und in thematische Kapitel unterteilt

(b) Bildschirmfoto des im E-Labor erstellten Videos zu den zentralen Funktionen des Oszilloskops

Abbildung 9.3: Bildschirmfotos aus den bereitgestellten Videos für die KG

Neben den Videos werden das Benutzerhandbuch sowie transkribierte Erläuterungen mit schematischen Darstellungen des Oszilloskops und seiner Funktionen bereitgestellt. Zusätzlich stehen Übungsblätter zur Verfügung, die auch im regulären *Versuch 0* des E-Labors zum Einsatz kommen. Dadurch können sich die Teilnehmenden der Kontrollgruppe auf theoretischer Ebene mit Fragestellungen zum Oszilloskop auseinandersetzen. Beide Gruppen erhalten folglich inhaltlich nahezu identische Informationen, jedoch über unterschiedliche Medien.

9.4 Statistische Auswertung

9.4.1 Auswertungstools und Messverfahren

Die statistische Auswertung erfolgt mit *Excel* und dem Statistikprogramm *SPSS Version 29.0*. Zunächst wird eine Reliabilitätsprüfung der Messinstrumente durchgeführt, um darauf aufbauend die Skalen für die weiteren Berechnungen anzupassen. Danach liefert eine deskriptive Analyse Einblicke in die Vorerfahrungen der Teilnehmenden.

Die Studie basiert auf einem zweifaktoriellen, gemischten Design, das Innersubjekt- und Zwischensubjektfaktoren kombiniert (Zeit * Gruppe). Der Innersubjektfaktor beschreibt die Messwiederholung über zwei Zeitpunkte (Prä- und Post-Test) hinweg, wobei jeweils dieselben Personen erfasst werden. Die Gruppenzugehörigkeit (Interventions- vs. Kontrollgruppe) stellt hingegen einen Zwischensubjektfaktor dar, da jede Person nur einer der beiden Gruppen eindeutig zugeordnet ist. Entsprechend handelt es sich bei den zeitlichen Messungen um abhängige Stichproben, während die Gruppen unabhängig voneinander betrachtet werden.

Zur Analyse eignet sich eine gemischte Varianzanalyse (engl. *Analysis of Variances (ANOVA)*) mit Messwiederholung, bei der sowohl inner- als auch zwischensubjektliche Effekte berücksichtigt werden. Dieses Verfahren erlaubt es, Wechselwirkungen zwischen dem Faktor Zeit und der Gruppenzugehörigkeit statistisch zu prüfen [CH17]. Konkret analysiert die ANOVA Unterschiede in den Mittelwerten in Abhängigkeit von beiden Faktoren [Fie13] und untersucht drei zentrale Effekte [Wal24]:

1. Test der innersubjektlichen Faktoren bzw. Haupteffekt „Zeit“ (Messwiederholung): Erfasst, ob sich die Werte zwischen den beiden Messzeitpunkten unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit signifikant verändern. Hat sich die Leistung *insgesamt* über die Zeit verändert?

2. Test der zwischensubjektlichen Faktoren bzw. Haupteffekt „Gruppe“: Prüft, ob sich die Gruppen in ihren Mittelwerten grundsätzlich unterscheiden, unabhängig von der Zeit.
3. Interaktionseffekt Zeit * Gruppe: Gibt an, ob sich die Leistung über die Zeit je nach Gruppe unterschiedlich verändert.

Der Interaktionseffekt stellt die zentrale Fragestellung dieser Studie dar. Eine signifikante Wechselwirkung zwischen Zeit und Gruppenzugehörigkeit weist darauf hin, dass sich der Effekt der Intervention nicht ausschließlich durch einen allgemeinen Lernzuwachs erklären lässt, sondern spezifisch auf die Art der Vorbereitung zurückzuführen ist. In diesem Fall zeigt ein Unterschied, wie stark sich die Leistung durch die Nutzung der AR-Anwendung im Vergleich zu klassischen Lernmaterialien verändert.

Bevor die Varianzanalyse mit Messwiederholung durchgeführt werden kann, sind drei grundlegende Voraussetzungen zu prüfen (z. B. [BS11] und [Hem25]):

1. Die abhängige Variable ist *intervallskaliert*, d. h. die Abstände zwischen den Messwerten sind gleich und es existiert kein Nullpunkt.
2. *Normalverteilung* der abhängigen Variablen innerhalb jeder Gruppe: Diese ist für $N > 30$ immer erfüllt und lässt sich andernfalls mit dem *Shapiro-Wilk-Test* oder durch visuelle Prüfung der *Q-Q-Plots* beurteilen.
3. *Sphärizität* für die Messwiederholungen: Sie gilt erst ab drei Messzeitpunkten und wird z. B. mittels des *Mauchly-Tests* geprüft. Sie ist erfüllt, wenn die Varianzen der Differenzen zwischen allen Zeitpunkten gleich ausfallen.

Die erste Voraussetzung ist erfüllt, da die Punkteverteilung im Online-Test intervallskaliert ist. Mit einer Stichprobengröße von $N > 30$ im Sinne des zentralen Grenzwertsatzes ist auch die zweite Bedingung erfüllt [Gir92]. Die Sphärizität gilt in der vorliegenden Untersuchung definitionsgemäß als gegeben, da sie erst bei mindestens drei Messzeitpunkten relevant wird [Gir92]. In einer Messwiederholung mit zwei Zeitpunkten (Prä-Post-Test) stellt diese Voraussetzung daher kein Ausschlusskriterium dar. SPSS berücksichtigt dies automatisch in der Option „Messwiederholung“ im Modul *Allgemeines lineares Modell*⁵³ und prüft zugleich die Homogenität der Varianzen [Fie13].

⁵³ engl. *General Linear Model (GLM)*

Zur Beantwortung der letzten beiden Forschungsfragen ergänzt eine Korrelationsanalyse die ANOVA. Dabei untersucht sie den Zusammenhang zwischen verschiedenen Prädiktoren, wie Vorerfahrung oder experimentellem Selbstkonzept, und den Testergebnissen.

Die Bewertung der AR-Anwendung erfolgt auf Basis der SUS- und UEQ-Fragebögen sowie der qualitativen Freitextantworten. Dazu fließen deskriptive Kennwerte wie Mittelwert und Standardabweichung ein [SL16]. Benchmark-Daten dienen als Vergleichsrahmen zur Einordnung der Ergebnisse. Auf diese Weise lassen sich konkrete Schwachstellen und potenzielle Optimierungsbedarfe der App identifizieren.

9.4.2 Reliabilitätsprüfung der Messinstrumente

Moodle-Test

Die Fragen im Moodle-Test sind sowohl thematisch nach den Funktionen des Oszilloskops gegliedert als auch den Taxonomiestufen *Wissen*, *Verständnis*, *Analyse* und *Anwendung* zugeordnet. Die Reliabilitätsanalyse zeigt dabei unterschiedliche Werte für die jeweiligen inhaltlichen Kategorien (Tab. 9.1) sowie für die einzelnen Stufen (Tab. 9.2).

Trotz einer vorherigen Pilotierung des Online-Tests mit drei verschiedenen Gruppen – Studierenden der Elektrotechnik, Physik sowie wissenschaftlichen Mitarbeitenden – weisen die ersten Taxonomiestufen eine geringe Reliabilität auf (Cronbachs Alpha $<= 0,7$) [Bla15]. Eine Ursache hierfür liegt in der geringen Anzahl an Fragen pro Stufe, da eine höhere Itemzahl den Einfluss einzelner, missverständlicher Fragen minimiert [Dör23]. Dies zeigt sich deutlich bei der Taxonomiestufe *Anwendung*, die mit zwölf Fragen eine Reliabilität von 0,808 erreicht, während über alle Fragen hinweg die Gesamtuverlässigkeit des Tests bei 0,855 liegt.

Besonders auffällig sind die Fragen F2 („Was stellt ein Oszilloskop grafisch dar?“) und F4 („In welchen Fällen ist ein Oszilloskop besonders hilfreich?“). Unklare Formulierungen führen zu Missverständnissen und beeinflussen die Reliabilität der jeweiligen Skalen negativ [Dör23]. Daher fließen in die weitere Analyse nur die korrigierten Taxonomiestufen ein, bei denen diese Fragen ausgeschlossen sind. Trotz einer leichten Verbesserung bleibt die Reliabilität der meisten Stufen dennoch unter 0,8. Die Ergebnisse dieser Skalen sind mit Vorsicht zu interpretieren, sodass sich die spätere Auswertung vorrangig auf die Gesamtpunktzahl des Moodle-Tests fokussiert.

Tabelle 9.1: Reliabilität der Kategorien aus Moodle ($N = 58$)

Kategorien	Anzahl Items	Cronbachs Alpha	Items
Allgemeine Verständnisfragen	7	0,494	F01 – F07
Zeitbasis	6	0,720	F08, F10, F14, F19, F20, F21
Empfindlichkeit	7	0,688	F09, F12, F13, F15, F16, F17, F18
Zeitbasis und Empfindlichkeit aggregiert	13	0,832	
Trigger	1	—	F11
Alle Fragen	21	0,855	
Alle Fragen korrigiert	19	0,867	ohne F02 & F04

Tabelle 9.2: Reliabilität der einzelnen Taxonomiestufen aus Moodle ($N = 58$)

Taxonomiestufe	Anzahl Items	Cronbachs Alpha	Items
Wissen	3	0,410	F01 – F03
Verständnis	4	0,580	F04 – F07
Analyse	2	0,679	F08, F09
Anwendung	12	0,808	F10 – F21

Fragebögen

Die Reliabilitätsprüfung der Fragebögen zeigt durchweg gute bis sehr gute Konsistenzen (vgl. Tab. 9.3) [Bla15]. Das exp. Selbstkonzept erreicht ein Cronbachs Alpha von 0,817, während die Skala *Überforderung/ Ängstlichkeit* mit 0,955 die

höchste Reliabilität aufweist. Nur das exp. Sachinteresse liegt mit 0,749 etwas niedriger als die anderen Skalen, was analog zum Online-Test auf die geringe Anzahl an Items zurückzuführen ist [Dör23].

Tabelle 9.3: Reliabilität der einzelnen Skalen aus Fragebogen 1 ($N = 61$)

Skala	Anzahl Items	Cronbachs Alpha	Items
exp. Selbstkonzept	8	0,817	U1_Expselbstkonzept01 – U1_Expselbstkonzept08
exp. Sachinteresse	3	0,749	U1_Expsachinteresse01 – U1_Expsachinteresse03
Überforderung	14	0,955	U1_Ueberforderung01 – U1_Ueberforderung14

Für die Berechnung der Reliabilität des SUS müssen die zehn Items zunächst umkodiert werden. Bei den ungeraden Items (1, 3, 5, 7, 9) geschieht dies durch die Subtraktion der ursprünglichen Bewertung mit 1, während für die geraden Items (2, 4, 6, 8, 10) die Differenz aus 5 und dem jeweiligen Itemwert berechnet wird. Die Reliabilität liegt in dieser Studie mit einem Cronbachs Alpha von 0,847 in einem guten Bereich [Bla15].

Die Reliabilitätsanalyse der UEQ-Skalen zeigt jedoch niedrigere Werte, die größtenteils unter 0,8 liegen (siehe Tab. 9.4). Besonders die Skalen *Durchschaubarkeit* ($\alpha = 0,477$) und *Effizienz* ($\alpha = 0,505$) weisen eine geringe interne Konsistenz auf. Lediglich die Skala *Attraktivität* ($\alpha = 0,872$) erreicht einen hohen Wert, während *Originalität* ($\alpha = 0,829$), *Stimulation* ($\alpha = 0,745$) und *Steuerbarkeit* ($\alpha = 0,713$) im mittleren Bereich liegen.

Die möglichen Ursachen sind bereits in Kapitel 7.4.4 weitestgehend erläutert und werden daher hier nicht weiter betrachtet.

9.4.3 Deskriptive Statistik

Proband:innen

Tabelle 9.5 zeigt die Anzahl der Studierenden, die an den jeweiligen Test- und Umfragezeitpunkten der Studie teilgenommen haben.

Teilnehmende, bei denen entweder der Test oder der Fragebogen unvollständig ist oder deren anonymisierte Codes nicht eindeutig zuordenbar sind, bleiben von der Analyse ausgeschlossen. Da die Studie auf die Erfassung von Veränderungen in kognitiven und affektiven Merkmalen abzielt, werden nur jene

Tabelle 9.4: Reliabilität der einzelnen Skalen des UEQ ($N = 28$)

Skala	Anzahl Items	Cronbachs Alpha	Items
Durchschaubarkeit	4	0,477	U3_UEQ02, 04, 13, 21
Effizienz	4	0,505	U3_UEQ09, 20, 22, 23
Steuerbarkeit	4	0,713	U3_UEQ08, 11, 17, 19
Originalität	4	0,829	U3_UEQ03, 10, 15, 26
Stimulation	4	0,745	U3_UEQ05, 06, 07, 18
Attraktivität	6	0,872	U3_UEQ01, 12, 14, 16, 24, 25

Tabelle 9.5: Anzahl der Teilnehmenden zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 an den jeweiligen Universitäten

	TU Dortmund			RWTH Aachen			Gesamt
	t_1	t_2	$t_1 \& t_2$	t_1	t_2	$t_1 \& t_2$	
Online-Test	40	33	26	41	40	32	58
Fragebogen 1: Selbsteinschätzung	26	27	24	37	37	37	61
Fragebogen 2: SUS & UEQ	-	14	-	-	14	-	28

einbezogen, die *entweder* im Online-Test *oder* im Fragebogen vollständige Daten *an beiden* Messzeitpunkten vorweisen. Die finale Stichprobe umfasst somit insgesamt $N_{\text{gesamt}} = 70$ Personen⁵⁴. Für den Online-Test verbleiben $N_{\text{kognitiv}} = 58$ auswertbare Fälle, davon $N_{\text{TU-DO}} = 26$ von der TU Dortmund und $N_{\text{RWTH}} = 32$ von der RWTH Aachen. Die Stichprobe für die Selbsteinschätzungen umfasst $N_{\text{affektiv}} = 61$ Personen, die zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 vollständig an der Befragung teilgenommen haben.

Die folgende Tabelle 9.6 zeigt die Verteilung nach Universität, Gruppenzugehörigkeit und Geschlecht.

⁵⁴ $N_{\text{gesamt}} = N_{\text{kognitiv}} \vee N_{\text{affektiv}} = 70$

Tabelle 9.6: Aufteilung der Studierenden in Universität, Gruppe und Geschlecht (mit w = weiblich und m = männlich) für die gesamte Stichprobe $N_{\text{gesamt}} = 70$.

Universität		Gruppe		Geschlecht		
RWTH	TU-DO	KG	IG	w	m	keine Angabe
39	31	42	28	10	52	8
Gesamt	70		70		70	

Vorerfahrung

Die Zielgruppe der Studie besteht überwiegend aus Studierenden im zweiten Semester ohne praktische Laborerfahrung oder Kenntnisse im Umgang mit Laborgeräten. Zur Überprüfung dieser Annahme misst der erste Abschnitt des ersten Fragebogens sowohl die Vorbereitung auf die anstehenden Laborpraktika als auch die Vertrautheit mit Laborgeräten. Zudem beinhaltet er eine Selbst-einschätzung der Teilnehmenden zu ihren bisherigen Erfahrungen mit diesen Geräten.

Insgesamt geben 45 Studierende an, sich auf das Praktikum vorbereitet zu haben (Frage Allg.1.1), davon 25 gezielt auf den Umgang mit Laborgeräten (Frage Allg.3.3 in Abb. 9.4).

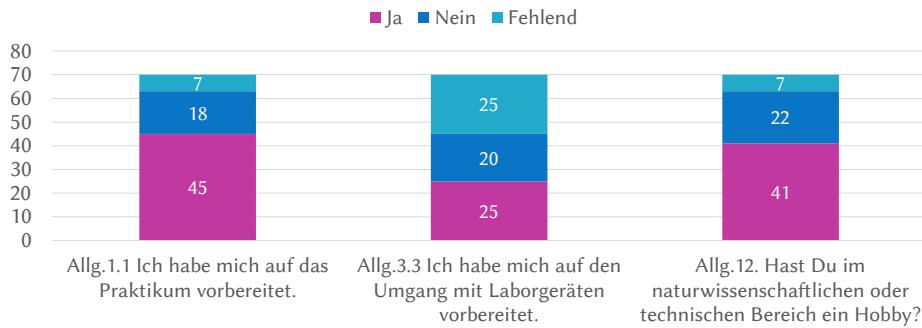


Abbildung 9.4: Deskriptive Statistik: Allgemeine Fragen mit Ja-/Nein-Antwortmöglichkeiten ($N_{\text{gesamt}} = 70$; $N_{\text{affektiv_t1}} = 63$)

Die Analyse der genutzten Vorbereitungsmaterialien zeigt, dass sich die Mehrheit dieser 45 Studierenden mithilfe von Skripten (40) oder Versuchsanleitungen (30) auf das Praktikum vorbereitet hat (Frage 3.1 in Abb. 9.5). Lediglich 8 Studierende haben sich speziell mit der Nutzung eines Oszilloskops auseinandergesetzt (Frage 3.2). Die verwendeten Materialien zur Vorbereitung (Frage 3.4) verteilen sich nahezu gleichmäßig auf Simulationen (12), Online-Ressourcen (12) und praktische Übungen mit einem realen Gerät (7).

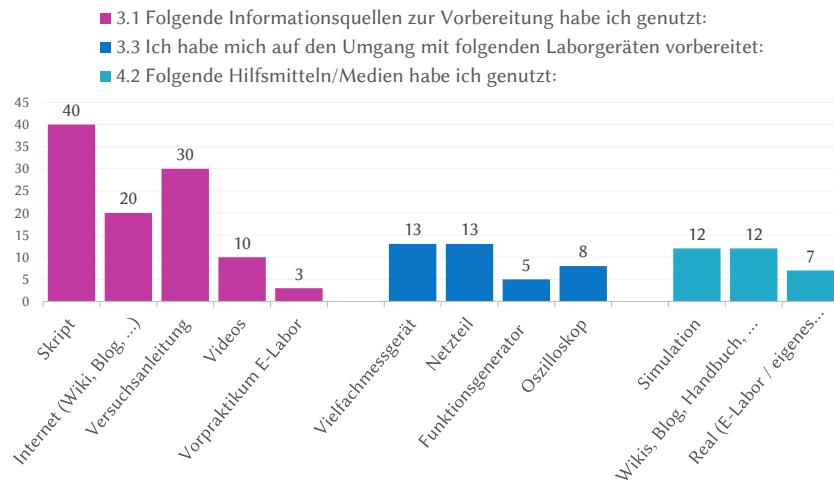


Abbildung 9.5: Deskriptive Statistik: Allgemeine Fragen zur Vorbereitung auf das Laborpraktikum (Mehrfachnennungen möglich) (N = 45)

Ein Teil der Studierenden hat sich weder mit den Laborgeräten (20) noch mit der allgemeinen Laborarbeit (18) vertraut gemacht. Als Hauptgrund hierfür nennen sie bereits vorhandene Vorerfahrung, die überwiegend aus dem Studium (23), der Schule (26) oder aus einem technischen Hobby (10) stammt (Frage 6.1 in Abb. 9.6).

Bei der expliziten Frage zur Selbsteinschätzung ihrer Erfahrung mit Oszilloskopen (Frage 6.3 in Abb. 9.7) geben knapp die Hälfte (33) der Studierenden an, entweder keine (15) oder kaum (18) Vorerfahrung zu besitzen, da sie ein Oszilloskop lediglich einmal gesehen haben. Die andere Hälfte (30) der Studierenden äußern, dass sie über praktische Erfahrung verfügen: 26 davon haben mindestens einmal mit einem Oszilloskop gearbeitet, 2 nutzen es gelegentlich, und weitere 2 sind mit verschiedenen Oszilloskop-Typen vertraut und in der Lage, konkrete Messungen durchzuführen (siehe Abb. 9.7).

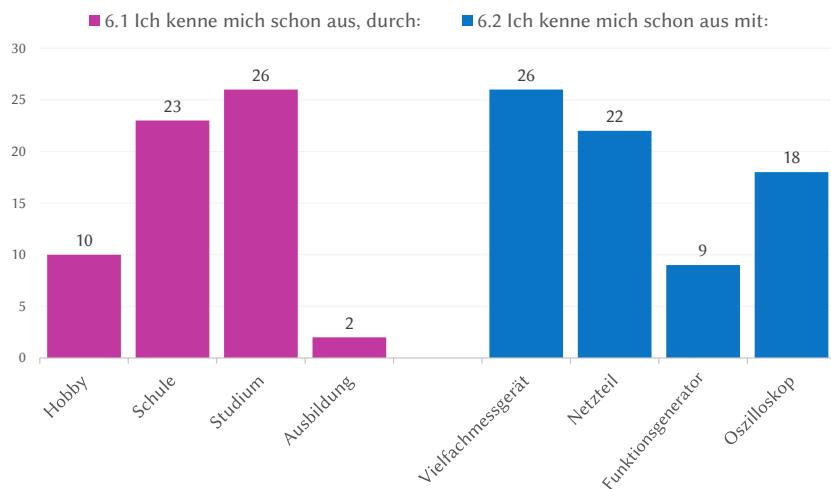


Abbildung 9.6: Deskriptive Statistik: Allgemeine Fragen zu Vorkenntnissen im Bereich Laborarbeit und -geräte (Mehrfachnennungen möglich) ($N_{\text{affektiv_t1}} = 63$)

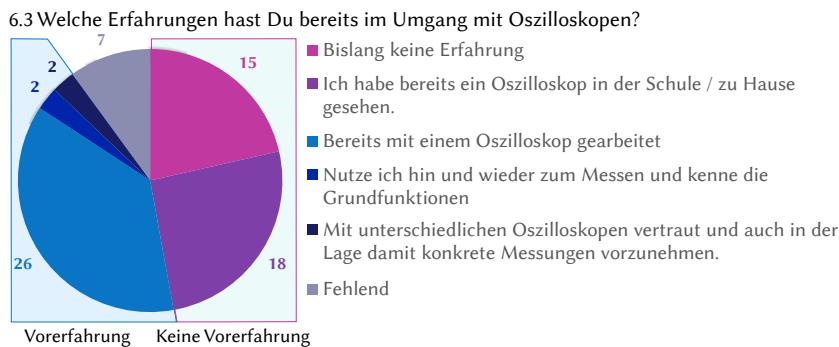


Abbildung 9.7: Deskriptive Statistik: Selbsteinschätzung zur Vertrautheit mit Oszilloskopen ($N = 70$)

9.4.4 Allgemeines lineares Modell

Moodle-Test

Für die Analyse des Moodle-Tests stehen die Ergebnisse von 58 Teilnehmenden zur Verfügung, darunter fallen 34 Proband:innen auf die Kontroll- und 24 auf die Interventionsgruppe.

Tabelle 9.7: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) für die jeweiligen Taxonomiestufen nach Gruppe und Zeitpunkt

Taxonomie-stufe	Wert	KG		IG		Gesamt	
		t_1	t_2	t_1	t_2	t_1	t_2
Wissen	M	3,88	4,12	3,67	4,42	3,79	4,24
	SD	1,51	1,72	1,63	1,82	1,55	1,75
Verständnis	M	8,32	9,06	8,00	8,58	8,19	8,86
	SD	2,73	2,49	3,20	2,81	2,91	2,61
Analyse	M	4,15	4,53	3,33	4,29	3,81	4,43
	SD	2,08	1,73	2,39	1,88	2,23	1,78
Anwendung	M	11,41	16,65	9,92	14,63	10,79	15,81
	SD	7,48	7,80	8,69	7,88	7,96	7,83

Tabelle 9.8: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der Gesamtpunkte, korrigierten Gesamtpunkte und Bearbeitungsdauer nach Gruppe und Zeitpunkt

Merkmal	Wert	KG		IG		Gesamt	
		t_1	t_2	t_1	t_2	t_1	t_2
Gesamtpunkte	M	27,76	34,35	24,92	31,92	26,59	33,34
	SD	10,98	10,85	12,97	11,79	11,82	11,21
Gesamtpunkte (korrigiert)	M	25,41	31,82	22,29	28,96	24,12	30,64
	SD	10,66	10,38	12,79	11,52	11,58	10,86
Dauer (in min)	M	16:14	11:38	15:37	11:45	15:58	11:41
	SD	06:55	03:57	06:22	04:18	06:39	04:04

Die Tabellen 9.7 und 9.8 geben einen Überblick über die Mittelwerte und Standardabweichungen der jeweiligen Taxonomiestufen und Gruppen.

Aus den vorliegenden Daten lässt sich bereits ableiten, dass beide Gruppen im Vergleich zum Vortest messbare Verbesserungen zeigen, sowohl in der Gesamtpunktzahl als auch in den einzelnen Taxonomiestufen⁵⁵. Diese Veränderung kann grafisch als lineare Entwicklung dargestellt werden, wie in der Abb. 9.8 zu sehen ist.

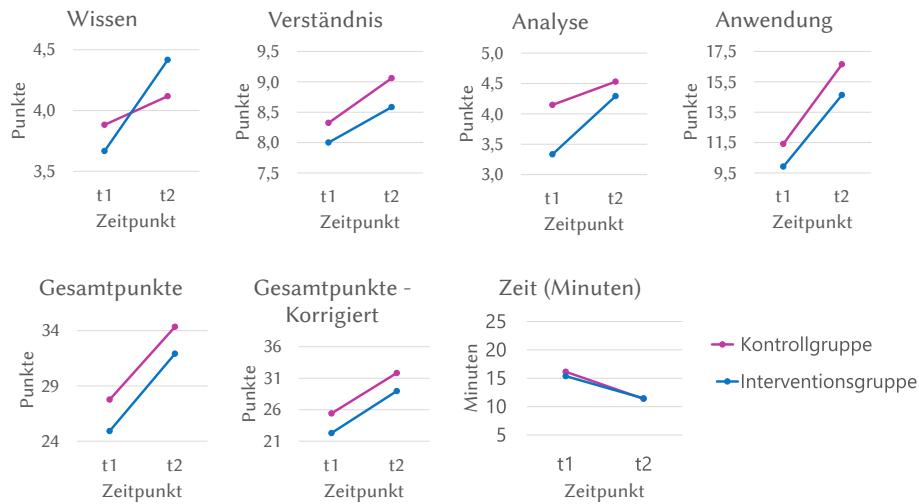


Abbildung 9.8: Erreichte Punkte im Online-Test pro Taxonomiestufe und insgesamt zu den jeweiligen Zeitpunkten t_1 und t_2 und unterteilt nach KG und IG.

Es zeigt sich zudem, dass die Interventionsgruppe in fast allen Taxonomiestufen sowie in der Gesamtpunktzahl minimal geringere Werte aufweist als die Kontrollgruppe. Mit Ausnahme der Taxonomiestufen *Wissen* und *Analyse* verlaufen die Geraden nahezu parallel, was darauf hindeutet, dass durch die Intervention keine signifikanten Gruppenunterschiede festzustellen sind⁵⁶. Besonders auffällig ist der starke Leistungsanstieg in beiden Gruppen, vor allem in Bezug auf die Gesamtpunktzahl. Um die Effekte der unabhängigen auf die abhängigen Variablen zu bewerten und folglich zu beurteilen, ob dieser Wissenszuwachs signifikant ist, lässt sich erst über Tests zu Innersubjekt- und Zwischensubjekteffekte feststellen (vgl. Tab. 9.9). Diese Tabelle hilft bei der Bestätigung oder Widerlegung der Hypothesen H1 und H2.

55 Mögliche Bestätigung der Hypothese H1

56 Mögliche Falsifizierung der Hypothese H2

Tabelle 9.9: Test der Innersubjekt- und Zwischensubjekteffekte sowie Multivariate Tests für die jeweiligen Taxonomiestufen aus Moodle mit den Prüfgrößen (F-Werte), Signifikanz (p-Werte) und partiellen Eta-Quadrat (η_p^2).

Taxonomiestufe	Quelle	Innersubjekteffekte - Sphärizität angenommen		Zwischensubjekteffekte		Multivariate Tests - Pillai-Spur	
		Zeitpunkt	Zeitpunkt * Gruppe	Konstanter Term	Gruppe	Zeitpunkt	Zeitpunkt * Gruppe
Wissen	F	3,97	1,08	476,35	0,01	3,97	1,08
	p	0,05*	0,30	0,00***	0,91	0,05*	0,30
	η_p^2	0,07	0,02	0,89	0,00	0,07	0,02
Verständnis	F	4,85	0,06	626,04	0,35	4,85	0,06
	p	0,03*	0,80	0,00***	0,56	0,03*	0,80
	η_p^2	0,08	0,00	0,92	0,01	0,08	0,00
Analyse	F	4,15	0,77	370,51	1,54	4,15	0,77
	p	0,05*	0,39	0,00***	0,22	0,05*	0,39
	η_p^2	0,07	0,01	0,87	0,03	0,07	0,01
Anwendung	F	29,93	0,08	190,55	0,85	29,93	0,08
	p	0,00***	0,77	0,00***	0,36	0,00***	0,77
	η_p^2	0,35	0,00	0,77	0,01	0,35	0,00
Gesamtpunkte	F	31,15	0,03	442,50	0,87	31,15	0,03
	p	0,00***	0,87	0,00***	0,35	0,00***	0,87
	η_p^2	0,36	0,00	0,89	0,02	0,36	0,00
Gesamtpunkte - Korrigiert	F	32,24	0,01	385,34	1,17	32,24	0,01
	p	0,00***	0,91	0,00***	0,28	0,00***	0,91
	η_p^2	0,37	0,00	0,87	0,02	0,37	0,00
Dauer	F	20,71	0,15	572,89	0,05	20,71	0,15
	p	0,00***	0,70	0,00***	0,83	0,00***	0,70
	η_p^2	0,27	0,00	0,91	0,00	0,27	0,00

Hinweis: $p < 0,05$ (*), $p < 0,01$ (**), $p < 0,001$ (***). Gelb hinterlegte Zellen kennzeichnen kleine bis mittlere Effektgrößen ($\eta_p^2 \geq 0,06$), blau hinterlegte Zellen stehen für mittlere bis große Effektgrößen ($\eta_p^2 \geq 0,14$) nach Cohen (1988). Rot hinterlegte Zellen markieren signifikante F-Werte. Freiheitsgrade: $df_1 = 1$, $df_2 = 56$.

Bei der Analyse der Innersubjekteffekte wird ausschließlich die Zeile „*Sphärizität angenommen*“ betrachtet. Liegt keine Sphärizität vor, kommen alternative Korrekturverfahren wie „*Greenhouse-Geisser*“, „*Huynh-Feld*“ oder die „*Untergrenze*“ zur Anwendung. Da jedoch eine zweistufige ANOVA vorliegt, ist die Sphärizitätsannahme stets erfüllt (vgl. Kapitel 9.4).

Die Werte für die „*Typ-III-Quadratsumme*“, die „*Freiheitsgrade*“ und das „*Mittel der Quadrate*“ sind in den Tabellen zu den Innersubjekteffekten nicht aufgeführt, da sie ausschließlich zur Berechnung der *Prüfgröße* (*F-Wert*) und der Signifikanz (*p-Wert*) verwendet werden [Fie13]. In der Zeitreihenanalyse liefern die statistischen Maße des *multivariaten Tests*, darunter „*Pillai-Spur*“, „*Wilks-Lambda*“, „*Hotelling-Spur*“ und „*Rroys größte charakteristische Wurzel*“, übereinstimmende Ergebnisse bezüglich der Prüfgröße und der Signifikanz [Fie13]. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, werden diese Werte ebenfalls in Tabelle 9.9 nicht angegeben. Der Wert df_1 entspricht der Anzahl der Gruppen minus eins ($df_1 = 1 = q_1$), während df_2 aus der Gesamtzahl der Teilnehmenden abzüglich der Gruppenzahl resultiert ($df_2 = 56 = q_2$).

Ein Vergleich der *F*-Werte mit der *F*-Verteilungstabelle (siehe Anhang S. LXVI) ergibt einen kritischen Wert von $F_{q_1, q_2} = 4,016$. Auf einem Signifikanzniveau von 5 % zeigt sich damit ein signifikanter Effekt in den Taxonomiestufen *Verständnis* ($F = 4,85$), *Analyse* ($F = 4,15$) und *Anwendung* ($F = 29,93$), wie in Tab. 9.9 in Rot dargestellt. Auch für das Gesamtergebnis über beide Zeitpunkte hinweg lassen sich signifikante Effekte feststellen, mit Werten von 31,15 bzw. 32,24 für die korrigierten Gesamtpunkte. Zudem erweist sich die Bearbeitungsdauer der Moodle-Aufgaben mit einem *F*-Wert von 20,71 als hochsignifikant.

Die Effektstärken, gemessen am *partiellen Eta-Quadrat* (η_p^2), fallen für die meisten Taxonomiestufen mittelstark aus ($\leq 0,10$) (gelbe Bereiche), gemäß den von Cohen (1988) definierten Intervallen für Effektstärken (siehe [LL22]). Dies betrifft insbesondere *Wissen* (0,07), *Verständnis* (0,08) und *Analyse* (0,07). Im Gegensatz dazu weisen die Taxonomiestufe *Anwendung* (0,35), die Gesamtpunktzahl (0,36 bzw. 0,37) sowie die Bearbeitungsdauer (0,27) eine sehr große Effektstärke auf ($\geq 0,2$) (blaue Bereiche).

Der Interaktionseffekt zwischen *Zeitpunkt* und *Gruppe* zeigt hingegen keine Signifikanz, was auch die deskriptive Statistik bestätigt. Über beide Zeitpunkte hinweg bestehen keine Unterschiede zwischen den Gruppen. Sowohl die Studierenden, die die AR-App nutzen, als auch diejenigen mit klassischen Vorbereitungsmaterialien verbessern ihre Leistungen in ähnlichem Maße signifikant.

Alle F-Werte liegen hierbei deutlich unter dem kritischen Wert von $F_{1,56} = 4,016$, der in der F-Verteilungstabelle angegeben ist.

Folglich kann die Hypothese H1 bestätigt werden: Die Nutzung der AR-App hat einen signifikant positiven Effekt auf *Wissen und Verständnis* (H1.1) sowie auf *Analyse- und Anwendungsfähigkeiten* (H1.2) im Umgang mit Oszilloskopen. **Hypothese H2 wird hingegen verworfen**, da keine signifikanten Unterschiede zwischen den Studierenden festgestellt werden können, unabhängig davon, ob sie die AR-App oder herkömmliche Vorbereitungsmaterialien verwenden.

Umfrage 1

Die deskriptive Analyse der Mittelwerte aus den Umfrageergebnissen zu exp. Selbstkonzept, exp. Sachinteresse und empfundener Überforderung (siehe Tab. 9.10) zeigt vergleichbare Ergebnisse zum Moodle-Test.

Tabelle 9.10: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der Skalen exp. Selbstkonzept, exp. Sachinteresse und Überforderung/ Ängstlichkeit nach Gruppe und Zeitpunkt

Skala	Wert	KG		IG		Gesamt	
		t_1	t_2	t_1	t_2	t_1	t_2
exp. Selbstkonzept	M	3,67	3,79	3,79	3,94	3,72	3,85
	SD	0,70	0,75	0,67	0,70	0,69	0,73
exp. Sachinteresse	M	3,01	3,86	3,02	3,77	3,02	3,83
	SD	0,68	0,62	0,62	0,73	0,65	0,66
Überforderung	M	2,32	2,21	2,24	2,07	2,29	2,16
	SD	0,92	0,94	1,04	1,03	0,96	0,97

Beide Gruppen, sowohl KG als auch IG, verbessern sich nach der Vorbereitung; das exp. Selbstkonzept und das exp. Sachinteresse steigen in beiden Gruppen nahezu parallel, während die empfundene Überforderung abnimmt⁵⁷. Die deutlichste Veränderung zeigt sich beim exp. Sachinteresse mit einer Differenz von 0,85.

⁵⁷ Mögliche Bestätigung von Hypothese H3 und Widerlegung von H4

Tabelle 9.11 fasst die Testergebnisse der Innersubjekt- und Zwischensubjekt-Analysen für die einzelnen Skalen des Fragebogens zusammen, mit dessen Hilfe sich die Hypothesen H3 und H4 konkret bestätigen oder widerlegen lassen.

Die Ergebnisse belegen, dass der Faktor *Zeitpunkt* für alle Skalen einen hohen F-Wert ($F \geq 4,016$) aufweist und somit ein signifikantes Niveau erreicht. Dies bedeutet, dass die Intervention über die zwei Messzeitpunkte hinweg einen starken Einfluss auf das exp. Selbstkonzept, das exp. Sachinteresse und die empfundene Überforderung der Studierenden hat.

Tabelle 9.11: Test der Innersubjekt- und Zwischensubjekteffekte für die jeweiligen Skalen aus Fragebogen 1 zu affektiven Merkmalen mit den Prüfgrößen (F-Werte), Signifikanz (p-Werte) und partiellen Eta-Quadrat (η_p^2).

	Quelle	Innersubjekteffekte - Sphärizität angenommen		Zwischensubjekt- effekte	
		Zeitpunkt	Zeit * Gruppe	Konstanter Term	Gruppe
exp. Selbst -konzept	F	4,27	0,04	1850,54	0,58
	p	0,04*	0,85	0,00	0,45
	η_p^2	0,07	0,00	0,97	0,01
exp. Sach- interesse	F	75,48	0,30	2108,83	0,08
	p	0,00***	0,59	0,00	0,78
	η_p^2	0,56	0,01	0,97	0,00
Überforderung/ Ängstlichkeit	F	8,33	0,32	309,62	0,19
	p	0,01**	0,57	0,00	0,67
	η_p^2	0,12	0,01	0,84	0,00

Hinweis: $p < 0,05(*)$, $p < 0,01(**)$, $p < 0,001(***)$. Gelb hinterlegte Zellen kennzeichnen kleine bis mittlere Effektgrößen ($\eta_p^2 \geq 0,06$), blau hinterlegte Zellen stehen für mittlere bis große Effektgrößen ($\eta_p^2 \geq 0,14$) nach Cohen (1988). Rot hinterlegte Zellen markieren signifikante F-Werte. Freiheitsgrade: $df_1 = 1$, $df_2 = 59$.

Die Effektstärken (η_p^2) unterscheiden sich je nach Skala: Für das exp. Selbstkonzept liegt der Wert bei 0,07 und ist somit als mittelstark einzustufen [LL22]. Im Gegensatz dazu zeigen das exp. Sachinteresse (0,561) sowie die Überforderung (0,124) sehr große Effektstärken [LL22]. Allerdings existiert kein Unterschied zwischen den Gruppen über die Zeit (*Zeitpunkt * Gruppe*). Die Signifikanzwerte bleiben niedrig, und der F-Wert variiert nur geringfügig zwischen den Gruppen über die beiden Messzeitpunkte hinweg.

Daraus lässt sich Hypothese H3 bestätigen: Die Nutzung der AR-App wirkt sich signifikant positiv auf das exp. Selbstkonzept (H3.1) und das exp. Sachinteresse (H3.2) aus und reduziert gleichzeitig Überforderung bzw. Ängstlichkeit vor Laborversuchen (H3.3). **Hypothese H4 wird hingegen verworfen**, da zwischen der AR- und der Kontrollgruppe keine signifikanten Unterschiede in den affektiven Merkmalen nachweisbar sind.

9.4.5 Weitere Untersuchungen

In einem weiteren Schritt werden zusätzliche Analysen durchgeführt, um die Zusammenhänge zwischen den affektiven Einstellungen und der kognitiven Leistung zu ermitteln.

Korrelationsanalyse

Die Korrelationen zwischen der Gesamtpunktzahl zum Zeitpunkt t_1 und den Skalen Überforderung, exp. Selbstkonzept sowie exp. Sachinteresse aus dem ersten Fragebogen sind in Tabelle 9.12 aufgeführt. Diese Analyse berücksichtigt sowohl die Stärke als auch die Richtung der Zusammenhänge, um mögliche Wechselwirkungen zwischen kognitiven und affektiven Faktoren zu identifizieren.

Auffällig und erwartungsgemäß ist die negative Korrelation der Überforderung mit allen anderen Skalen. Der Pearson-Korrelationskoeffizient zwischen der Gesamtpunktzahl und der Überforderung beträgt $-0,49$ und weist mit einem Signifikanzniveau von $p < 0,001$ eine hohe statistische Relevanz auf. Dies legt nahe, dass ein besseres Gesamtverständnis mit einer geringeren empfundenen Überforderung einhergeht. Ein ähnlicher Zusammenhang zeigt sich beim exp. Selbstkonzept, das mit $-0,55$ ebenfalls stark negativ mit der Überforderung korreliert. Je ausgeprägter das Vertrauen in die eigene experimentelle Kompetenz, desto geringer fällt das Gefühl der Überforderung aus, auch hier mit einer hohen Signifikanz ($p < 0,001$). Für das exp. Sachinteresse ergibt sich eine schwache negative Korrelation von $-0,16$, die mit $p = 0,21$ nicht statistisch signifikant ist. Dies deutet darauf hin, dass ein höheres Interesse am Experimentieren nicht zwangsläufig mit einer geringeren Überforderung einhergeht. Trotz Motivation und Neugierde können unbekannte Laborgeräte oder die Beaufsichtigung durch Betreuende weiterhin Stress auslösen.

Zudem zeigt sich eine signifikante Korrelation zwischen der Gesamtpunktzahl und dem exp. Selbstkonzept ($r = 0,47, p = 0,001$) sowie zwischen experimentellem Sachinteresse und experimentellem Selbstkonzept ($r = 0,33, p = 0,007$).

Studierende mit einem ausgeprägten exp. Selbstkonzept erzielen tendenziell höhere Gesamtpunktzahlen, während ein starkes Selbstkonzept mit einem erhöhten Interesse an experimentellen Themen verbunden ist.

Tabelle 9.12: Korrelation zwischen der Gesamtpunktzahl aus Moodle und den verschiedenen Skalen aus dem Fragebogen 1 zum Zeitpunkt t_1

		Gesamt- punktzahl $_{t1}$	Über- forderung	exp. Selbst- konzept	exp. Sachin- teresse
Gesamt- punktzahl $_{t1}$	Pearson- Korrelation	1	-0,49	0,47	0,17
	Sig. (2-seitig)		0,001***	0,001***	0,240
	N	58	52	52	52
Überforderung	Pearson- Korrelation		1	-0,55	-0,16
	Sig. (2-seitig)			0,001***	0,212
	N	52	63	63	63
exp. Selbstkonzept	Pearson- Korrelation			1	0,33
	Sig. (2-seitig)				0,007**
	N	52	63	63	63
exp. Sachinteresse	Pearson- Korrelation				1
	Sig. (2-seitig)				
	N	52	63	63	63

Hinweis: $p < 0,05$ (*), $p < 0,01$ (**), $p < 0,001$ (***).

Allgemeines lineares Modell mit weiteren unabhängigen Variablen

Im Rahmen einer zusätzlichen Analyse des allgemeinen linearen Modells fließen weitere unabhängige Variablen in die Untersuchung des Testergebnisses ein. Dazu zählen das Geschlecht, die gezielte Vorbereitung auf den Umgang mit Labgeräten sowie die Vorerfahrung mit dem Oszilloskop (basierend auf Frage 6.3 in Abb. 9.7). Die Kreuztabelle mit den Fallzahlen ist als Matrix für die jeweiligen Kategorien in Tabelle 9.13 strukturiert aufgeführt.

Tabelle 9.13: Strukturierte Fallzahlenmatrix nach Vorerfahrung, Gruppe, Vorbereitung mit Laborgeräten und Geschlecht

		Vorbereitung Laborgeräte							
		Ja				Nein			
		Geschlecht		Geschlecht					
Vorerfahrung	Gruppe	m	w	m	w	Summe			
Ohne	KG	8	1	2	2	13			
	IG	5	0	4	1	10			
Mit	KG	5	1	6	0	12			
	IG	3	1	5	0	9			

Da die Einbeziehung von vier unabhängigen Variablen insgesamt 16 Kombinationsmöglichkeiten (2^4) ergibt, wird eine tabellarische Darstellung der Mittelwerte für die Gesamtpunktzahlen zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 schnell unübersichtlich. Zudem verringert sich die Anzahl der Proband:innen pro Kombination erheblich, was aufgrund der ohnehin kleinen Stichprobe problematisch ist. Eine ANOVA auf Basis mehrerer Einflussgrößen würde unter diesen Bedingungen keine validen Ergebnisse liefern. Deswegen berücksichtigt die weiterführende Analyse lediglich die Vorerfahrung mit Oszilloskopen als relevante Einflussvariable (siehe Tab. 9.14).

Tabelle 9.14: Kompakte ANOVA-Ergebnisse zur Gesamtpunktzahl mit Prüfgrößen (F), Signifikanz (p) und partiellen Eta-Quadraten (η_p^2).

Variable	Quelle	Zeitpunkt	Zeitpunkt * Vorerfahrung	Zeitpunkt * Gruppe * Vorerfahrung	Gruppe	Gruppe * Vorerfahrung
Gesamtpunkte	F	24,14	0,02	0,04	0,33	0,15
	p	0,00	0,904	0,838	0,571	0,696
	η_p^2	0,33	0,00	0,00	0,01	0,00

Hinweis: $p < 0,05$ (*), $p < 0,01$ (**), $p < 0,001$ (***). Blau hinterlegte Zellen stehen für mittlere bis große Effektgrößen ($\eta_p^2 \geq .14$) nach Cohen (1988). Rot hinterlegte Zellen markieren signifikante F-Werte. Freiheitsgrade: $df_1 = 1$, $df_2 = 56$.

Wie bereits in der vorherigen ANOVA deutlich wird, liegt ein signifikanter Haupteffekt der Zeit vor ($F_{(1,48)} = 24,14$, $p < 0,001$, $\eta_p^2 = 0,33$), was auf eine starke Leistungssteigerung zwischen t_1 und t_2 hinweist.

Der Interaktionseffekt zwischen Zeit und Vorerfahrung ist nicht signifikant ($F = 0,02, p = 0,904$), ebenso wenig wie die dreifache Interaktion zwischen Zeit, Gruppe und Vorerfahrung ($F = 0,04, p = 0,838$). Daraus kann abgeleitet werden, dass sich die Wirkung der Intervention nicht systematisch zwischen Teilnehmenden mit und ohne Vorerfahrung unterscheidet. Die Leistungsverbesserung tritt unabhängig vom Vorwissen auf und zeigt keine differenzielle Wirkung zugunsten einer bestimmten Gruppe.

Auch die weiteren Zwischensubjekteffekte (Gruppe * Vorerfahrung) sind statistisch unbedeutend (alle $p > 0,10$), sodass sich generelle Unterschiede weder in Bezug auf die Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen noch auf die Vorerfahrung feststellen lassen. Die Ergebnisse legen nahe, dass beide Vorbereitungsmethoden gleichermaßen wirksam sind – unabhängig davon, ob bereits praktische Erfahrungen mit Oszilloskopen vorliegen. Ein zusätzlicher Nutzen für unerfahrene Studierende lässt sich statistisch nicht belegen.

9.4.6 SUS, UEQ und Freitextantworten

Nach der Umcodierung der einzelnen Items des SUS-Fragebogens (siehe Kapitel 9.4.2) ergibt sich die Gesamtsumme der Antworten durch die Summe der einzelnen Items. Diese wird mit 2,5 multipliziert, um den Gesamtscore zu berechnen. Das resultierende Histogramm ist in Abb. 9.9 dargestellt und zeigt einen Mittelwert von 65,09.

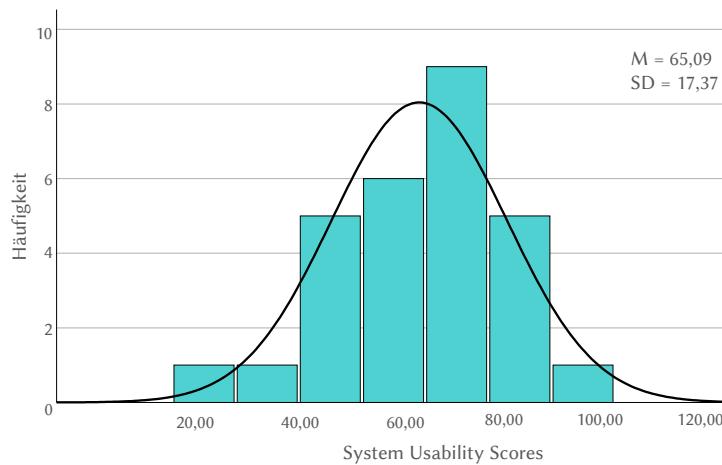


Abbildung 9.9: Histogramm des SUS-Fragebogens

Bangor et al. (2008) haben einen umfangreichen Datensatz aus SUS-Fragebögen analysiert und einen Benchmark erstellt, der es ermöglicht, Mittelwerte der Scores mit verschiedenen Adjektiven zu beschreiben [BKM08]. Demnach lässt sich die Benutzungsfreundlichkeit der AR-App mit „OK“ bewerten, während ein Wert von 71,4 erforderlich wäre, um sie als „Gut“ einzustufen. Zum Vergleich liegt der Durchschnitt für mobile Anwendungen bei 73,62 [BKM08]. Laut John Brookes (2021) gilt eine Usability als akzeptabel, wenn der Gesamtprozentsatz über 55 % liegt [KMD21]. Der SUS zeigt zwar Verbesserungspotenzial auf, gibt jedoch keine Hinweise darauf, in welchen Bereichen Optimierungen erforderlich sind. Daher kommt ergänzend der UEQ zum Einsatz. Nach der Umcodierung der Fragen lassen sich fünf Skalen bilden, deren Mittelwerte zwischen 0,6 und 1,0 (von 3) liegen, was als neutral einzustufen ist (siehe Abb. 9.10).

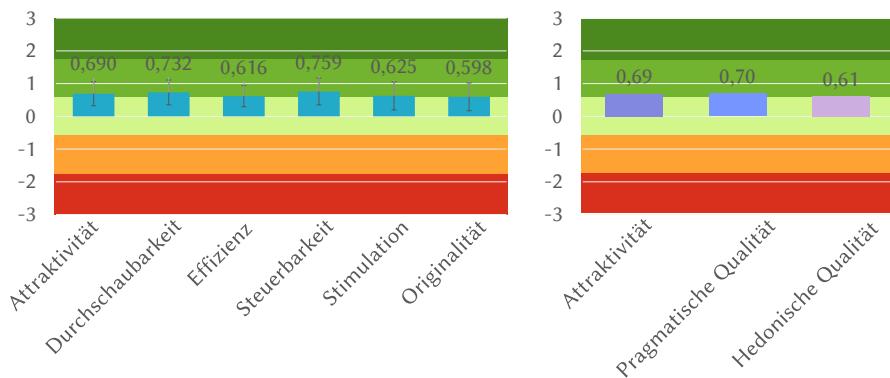


Abbildung 9.10: Gesamtergebnis des UEQ hinsichtlich der verschiedenen Skalen und Qualitätsaspekte.

Auch die Gruppierung der Skalen nach Qualitätsaspekten ergibt Werte im neutralen Bereich: Die Attraktivität liegt bei 0,69, die pragmatische Qualität bei 0,70 und die hedonische Qualität bei 0,61 von insgesamt 3 Punkten.

Ein Benchmark mit 21.175 Proband:innen aus 468 Studien zeigt hingegen, dass die App in allen Bereichen unter dem Durchschnitt abschneidet (siehe Abb. 9.11). Besonders auffällig sind die Bereiche Attraktivität, Durchschaubarkeit, Effizienz und Steuerbarkeit, die im unteren Viertel liegen.

Der UEQ hilft dabei, spezifische Bereiche der App zu identifizieren, die weiter optimiert werden sollten. Um ein besseres Verständnis für die kritischen Aspekte und die Ursachen der niedrigen Bewertungen zu gewinnen, werden die Freitextantworten von 19 Studierenden analysiert. Die Antworten lassen sich durch induktives Clustern in fünf Hauptkategorien unterteilen.

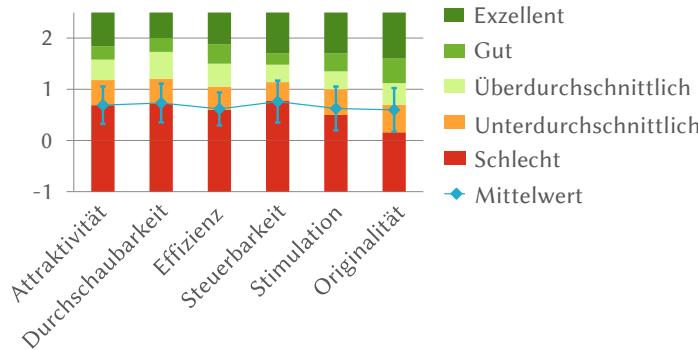


Abbildung 9.11: Benchmark der App-Version 0.17.07 im Vergleich zu anderen Studien, die mit dem UEQ erfasst wurden.

Am häufigsten äußern die Teilnehmenden Kritik an der **Bedienung und Hilfestellung** (zehn Nennungen). Die Aussagen beziehen sich vorwiegend auf ein unzureichendes Navigationskonzept und fehlende oder nicht hilfreiche Erklärungen. Kommentare wie „*Das Menü war nicht so ganz verständlich*“ oder „*Manchmal waren die Hilfestellungen nicht sehr hilfreich*“ verdeutlichen, dass die Nutzerführung noch verbessert werden muss. Diese Rückmeldungen decken sich mit den niedrigen Bewertungen der UEQ-Skalen Durchschaubarkeit und Steuerbarkeit.

Ebenfalls häufig kritisiert wird die **Funktionalität** der App (zehn Nennungen). Teilnehmende beklagen eingeschränkten Zugriff auf bestimmte Gerätefunktionen und technische Mängel („*Nicht alle Funktionen des Geräts konnten benutzt werden*“). Die Ursachen liegen jedoch nicht ausschließlich in technischen Defiziten, sondern auch in der didaktischen Konzeption: Funktionen werden bewusst stufenweise freigeschaltet, abhängig vom Lernlevel. Zudem sind bestimmte Elemente – etwa das Trigger-Menü – gezielt deaktiviert, da sie nicht Bestandteil des Praktikums A oder der Evaluation im Online-Test sind.

Das **Design und die Nutzungsoberfläche** (acht Nennungen) stehen ebenfalls in der Kritik. Die App wird teils als veraltet („*Alles ziemlich altmodisch*“) und das Menü als wenig intuitiv wahrgenommen. Diese Eindrücke spiegeln sich in der schwachen Bewertung der UEQ-Skala *Attraktivität*. Unklar bleibt jedoch, ob sich die Kritik auf das App-Design insgesamt oder auf die bewusst realitätsnahe

Darstellung des Oszilloskops bezieht. Technische Aspekte wie die schwierige Bedienung der virtuellen Drehregler über Touchscreen („*Drehregler sind per Touch nur sehr schwer einstellbar*“) ergänzen diesen Befund.

Die **Leistung und Performance** (fünf Nennungen) werden ebenfalls be- anstandet. Rückmeldungen wie „*Langsam beim Laden*“ oder „*Keine schnelle Reaktion*“ deuten auf Optimierungsbedarf hin. Diese Aspekte lassen sich jedoch nur eingeschränkt verbessern, da die Performance stark vom verwendeten Endgerät und den zugrunde liegenden SDKs abhängt. Eine Verringerung der Texturauflösung kann zwar die Ladezeit verringern, geht jedoch einher mit einer schlechteren Lesbarkeit der Bedienelemente des Oszilloskops. Das würde sich insbesondere bei einer späteren Weiterentwicklung für MR-Brillen negativ auswirken.

Ein kleiner Teil der Antworten (drei Nennungen) verweist auf allgemeine Einschränkungen, etwa fehlende Zeit oder Unsicherheit beim Einstieg („*Ich war am Anfang verwirrt, wie das Ganze funktioniert*“).

Auf der anderen Seite wird die **Funktionalität** der App (sieben Nennungen) positiv hervorgehoben. Teilnehmende loben die realitätsnahe Darstellung der Geräte und die Möglichkeit, verschiedene Parameter zu verändern („*Unterschiedliche Variablen bzw. Achsen lassen sich einstellen*“). Diese Aussagen kontrastieren die kritischen Stimmen und weisen auf heterogene Nutzungserfahrungen hin.

Auch das **Lernerlebnis** (fünf Nennungen) wird positiv bewertet. Die App wird als innovatives und hilfreiches Lernwerkzeug wahrgenommen („*Das Konzept virtueller Messinstrumente zur Praktikumsvorbereitung finde ich sehr sinnvoll*“). Dies steht im Einklang mit der tendenziell besseren Bewertung der hedonischen Qualität der UEQ-Dimensionen.

Weitere lobende Aussagen betreffen das **Design** (drei Nennungen) und die generelle Nutzbarkeit der App (vier Nennungen). Kommentare wie „*Simples Interface*“ oder „*Die App war einfach zu bedienen*“ deuten darauf hin, dass zumindest ein Teil der Zielgruppe die App als zugänglich und funktional bewertet.

Insgesamt ergänzt die qualitative Auswertung die standardisierten Ergebnisse des SUS- und UEQ-Fragebogens. Die genannten Schwächen konkretisieren die gemessenen Defizite in Funktionalität, Design und Steuerbarkeit, während die positiven Rückmeldungen Potenziale der App unterstreichen und Ansatzpunkte für ihre Weiterentwicklung bieten.

9.5 Zusammenfassung und Diskussion

Ziel dieser Studie ist es, den Einfluss der AR-App auf das Verständnis und die Handlungskompetenz beim Umgang mit Oszilloskopen sowie auf affektive Faktoren wie das exp. Selbstkonzept, das exp. Sachinteresse und das Gefühl von Angst oder Überforderung vor der Laborarbeit zu analysieren. Die Ergebnisse bestätigen, dass die App zwar einen positiven Effekt auf den Wissenserwerb und die praktischen Fähigkeiten hat, dass sie im Vergleich zu gut aufbereiteten herkömmlichen Materialien jedoch keinen signifikanten Vorteil bietet. Beide Gruppen – unabhängig davon, ob sie die AR-App oder klassische Materialien nutzen – zeigen eine signifikante Leistungssteigerung. Somit lässt sich die Hypothese H1 bestätigen, da die App einen signifikanten positiven Effekt auf Wissen und Verständnis (H1.1) sowie auf die Analyse- und Anwendungsfähigkeiten (H1.2) im Umgang mit Oszilloskopen hat. Hypothese H2 hingegen wird verworfen, da die Unterschiede zwischen den Gruppen marginal ausfallen.

Die Auswertung der Fragebögen zeigt ein vergleichbares Bild, sodass Hypothese H3 bestätigt werden kann. In beiden Gruppen steigen sowohl das exp. Selbstkonzept (H3.1) als auch das exp. Sachinteresse (H3.2), während das Gefühl von Überforderung bzw. Angst vor der Laborarbeit abnimmt (H3.3). Dies deutet darauf hin, dass eine gründliche Vorbereitung – unabhängig vom verwendeten Medium – das Selbstvertrauen stärkt, das Interesse fördert und Stress sowie Ängste reduziert. Da keine signifikanten Gruppenunterschiede vorliegen, wird die Hypothese H4 verworfen.

Um den Einfluss der AR-App in Laborsituationen noch präziser zu untersuchen, sind weitere Studien mit größeren Stichproben erforderlich. Besonders relevant ist eine gezielte Untersuchung des Einflusses auf Studierende ohne praktische Vorerfahrung. Trotz der Fokussierung dieser Studie auf Studierende im Erst- und Zweitsemester ohne praktische Vorkenntnisse im Umgang mit Laborgeräten gibt über die Hälfte der Teilnehmenden an, bereits Erfahrungen zu besitzen. Eine Folgestudie, die ausschließlich auf Studierende ohne Vorerfahrung ausgerichtet ist, könnte klären, ob die Nutzung der AR-App den Zugang zu Laborgeräten erleichtert und den Wissenserwerb effektiver gestaltet. Weiterhin sollte zukünftige Forschung verstärkt die Langzeitwirkung der AR-Nutzung berücksichtigen. Dies würde Aufschluss darüber geben, inwieweit mit der App erworbane Kenntnisse und Fähigkeiten über einen längeren Zeitraum erhalten bleiben.

Auch in der Gestaltung der App zeigt sich Optimierungspotenzial, das in zukünftigen Entwicklungszyklen weiter analysiert und verbessert werden sollte.

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

In dieser Dissertation steht die Entwicklung einer *mobilen Augmented Reality Anwendung (mAR-App)* im Zentrum. Als strukturierender Rahmen dient der Makrozyklus vom *Design-Based Research (DBR)*, während das Research Pentagon nach Reinmann (2021) das eigentliche methodische Vorgehen auf Mikroebene bildet.

Das Research Pentagon umfasst die fünf Komponenten Forschungsgegenstand, Forschungsfrage, Forschungsziel, Forschungsmethode und Forschungssituation. Anstelle klassischer DBR-Mikrozyklen kommen eigenständige, spiralförmig aufeinander aufbauende Research Pentagons zum Einsatz, die jeweils eigene Fra gestellungen und Evaluationsschritte enthalten und dadurch eine fortschreitende Präzisierung des Gesamtkonzepts ermöglichen.

10.1.1 Abschnitt I: Problemstellung und Literatur

Problemstellung: Die erste Phase im Makrozyklus des DBR-Prozessmodells von Euler (2014) beginnt mit der präzisen Analyse eines realen Problems, das durch Literatur, Erfahrungen und kontextuelle Gegebenheiten gestützt wird. Im vorliegenden Fall stehen die Qualität und Organisation von Laborpraktika im ingenieurwissenschaftlichen Studium im Zentrum. Solche Praktika gelten als integraler Bestandteil der akademischen Ausbildung, da sie theoretisches Wissen mit praktischer Anwendung verknüpfen und Studierenden grundlegende exp. Kompetenzen vermitteln. Sie fördern die Fähigkeit, systematisch Daten zu erheben, kritisch zu reflektieren und komplexe technische Zusammenhänge zu verstehen.

Trotz ihrer hohen Relevanz bestehen in der konkreten Ausgestaltung jedoch erhebliche Optimierungspotenziale. An der Universität Paderborn fehlt es durch die dezentrale Organisation an einer übergreifenden Struktur, die die Praktika inhaltlich verknüpft und kompetenzorientiert aufeinander aufbaut. Unterschiede in Anforderungen, Materialien und Bewertungskriterien führen zu mangeln-

der Vergleichbarkeit und werden von Studierenden häufig als intransparent wahrgenommen.

Hinzu kommt die Heterogenität der Studierenden hinsichtlich ihrer Vorerfahrungen im Umgang mit Laborgeräten. Während einige bereits praktische Kenntnisse mitbringen, fehlt anderen jegliche Vorerfahrung. Dies führt insbesondere beim erstmaligen Arbeiten unter Zeitdruck im Labor zu Überforderung. Gleichzeitig entsteht aufseiten der betreuenden Laboringenieure ein erhöhter Unterstützungsbedarf, der wertvolle Zeit bindet, die eigentlich für die Durchführung der Experimente vorgesehen ist.

Zudem sind Vorbereitungsangebote außerhalb der Laborzeiten häufig eingeschränkt. Technische, personelle und finanzielle Ressourcen setzen enge Grenzen. Die COVID-19-Pandemie hat diesen Missstand zusätzlich verschärft: Zugangsbeschränkungen und/oder der Ausfall praktischer Veranstaltungen haben verdeutlicht, wie groß der Bedarf an orts- und zeitunabhängigen (Vorbereitungs-) Formaten für Laborpraktika ist. Gerade in diesem Kontext gewinnen digitale Lösungen zunehmend an Bedeutung. Insbesondere mobile Anwendungen auf Basis von AR ermöglichen Studierenden einen flexiblen und praxisnahen Zugang zu Laborgeräten, unabhängig von festen Laborzeiten oder der Verfügbarkeit realer Geräte.

Literaturauswertung: Um den zuvor beschriebenen Herausforderungen zu begegnen, wird zunächst der aktuelle Forschungsstand von AR in der Lehre und speziell in Laborpraktika durch eine systematische Literatuauswertung untersucht, die quantitative und qualitative Perspektiven kombiniert.

Die quantitative Analyse belegt ein kontinuierlich wachsendes Forschungsinteresse an AR-Anwendungen im Bildungsbereich. Sowohl die Anzahl der Publikationen als auch der beteiligten Autor:innen steigen deutlich an. Länder wie die USA, Indonesien und China nehmen dabei eine führende Rolle ein. Gleichzeitig zeigt sich eine Konzentration der Aktivitäten auf bestimmte Institutionen, während der Anteil neuer Autor:innen stetig zunimmt, was auf ein dynamisches und sich entwickelndes Forschungsfeld hinweist.

Die qualitative Auswertung verdeutlicht, dass AR in technischen Kontexten vorwiegend zur Visualisierung komplexer Sachverhalte sowie zur Unterstützung exp. Prozesse eingesetzt wird. Häufig dominieren markerbasierte Anwendungen, die reale Objekte mit virtuellen Informationen anreichern. Zahlreiche Studien berichten von positiven Effekten auf Motivation, Engagement und Interaktion der Lernenden. Die tatsächliche Lernwirksamkeit bleibt jedoch vielfach un-

klar, insbesondere da empirisch belastbare Daten selten erhoben werden. Auch methodisch zeigen sich Defizite, da viele Studien keine transparenten Evaluationsinstrumente verwenden oder vollständig auf Kontrollgruppen verzichten. AR-Anwendungen zur konkreten Vorbereitung auf Laborpraktika sind bislang kaum vorhanden und werden in der Forschung nicht systematisch behandelt.

Gleichzeitig verdeutlicht die Analyse mehrere Potenziale von AR sowohl für den allgemeinen Einsatz in der Lehre als auch speziell für die Gestaltung von Laborpraktika. Dazu gehören eine intuitivere Bedienung zu herkömmlichen Medien, die Visualisierung ansonsten nicht sichtbarer Prozesse und Phänomene, eine engere Verknüpfung realer und virtueller Informationsräume sowie eine gesteigerte Lernmotivation und ein reduzierter Betreuungsaufwand im Labor.

10.1.2 Abschnitt II: Mikrozyklen

Research Pentagon 1 – Didaktisches Konzept: Im Fokus des ersten Pentagons steht die Entwicklung eines didaktischen Konzepts, das technologieunabhängig und lernzielorientiert gestaltet ist. Sie bildet die Grundlage für eine nachhaltige Nutzung der Lehrmaßnahme. Das zugrunde liegende Modell bildet das Constructive Alignment, das Lernziele, Lernaktivitäten und Prüfungsformen systematisch aufeinander abstimmt. Die konkrete Ausgestaltung der Lernziele und Lernaktivitäten orientiert sich an der revidierten Taxonomie nach Bloom und deckt ein Spektrum kognitiver Anforderungen ab. Sie reichen von der Identifikation und Handhabung elektrotechnischer Komponenten bis zur gezielten Bedienung von Messgeräten. Die didaktische Umsetzung findet sich entlang einer systematisch abgestuften Struktur mit sechs Lernebenen (Level), die für das Oszilloskop wie folgt definiert sind:

- **Level 0 (Onboarding):** Einführung in die App-Nutzung zur Reduktion von Einstiegshürden und kognitiver Belastung.
- **Level 1 (Introduction):** Erlernen der Grundfunktionen des Oszilloskops durch Informationsdarstellung in Text und Bild.
- **Level 2 (Tutorial):** Interaktive Schritt-für-Schritt-Anleitungen zur gezielten Bedienung einzelner Funktionsbereiche des Oszilloskops.
- **Level 3 (Quiz):** Anwendung des erworbenen Wissens in einer Quiz-Situation, die sowohl der Wiederholung als auch dem Transfer dient.
- **Level 4 (Sandbox):** Offener Experimentiermodus zur eigenständigen Problemlösung und Förderung explorativen Lernverhaltens.

Research Pentagon 2 – Machbarkeitsstudie: Im zweiten Pentagon erfolgt die praktische Erprobung der theoretisch identifizierten Potenziale von Augmented - und *Virtual Reality (VR)* im Kontext technischer Laborpraktika, wobei zugleich überprüft wird, wie sich die im ersten Pentagon definierten Lernziele in unterschiedlichen Prototypen abbilden lassen. Ziel ist es, geeignete Technologien und Entwicklungsumgebungen zu identifizieren, frühzeitig Herausforderungen zu erkennen und zu prüfen, welcher Prototyp sich in welcher Phase des Praktikums sinnvoll integrieren lässt, um ausgewählte Lernziele zu erreichen.

Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie verdeutlichen, dass sich VR aufgrund technischer Einschränkungen nicht als Vorbereitungstool für Laborpraktika eignet. Im Gegensatz dazu eröffnet AR – trotz bestehender Herausforderungen – ein hohes didaktisches Potenzial. Entscheidend ist dabei eine stabile, markerunabhängige Umsetzung. Daher richtet sich der Fokus der weiteren Entwicklung auf eine markerlose, plattformübergreifende Lösung mithilfe der *ARCore*- und *ARKit-SDKs*.

Research Pentagon 3 – Onboarding: Im dritten Pentagon entsteht ein erstes Onboarding-Modul für die App-Version 0.17.01. Ziel der begleitenden Studie ist es, den Ersteindruck sowie die Akzeptanz der Anwendung bei den Nutzer:innen zu untersuchen. Das Onboarding ist als schrittweise, visuell unterstützte Anleitung konzipiert, die zentrale Funktionen des virtuellen Oszilloskops vermittelt. Dabei hebt das System relevante Bedienelemente gezielt hervor und blendet weniger wichtige Komponenten temporär aus. Diese Gestaltung soll die kognitive Belastung reduzieren und einen klaren, verständlichen Einstieg ermöglichen.

Die Ergebnisse des *User Experience Questionnaire (UEQ)* zeigen ein insgesamt neutrales bis leicht positives Bild der Nutzungserfahrung. Die qualitative Auswertung der Freitextantworten deckt zudem technische Defizite auf und liefert Hinweise auf weitere Herausforderungen. Diese sind im Zuge der Reflexionsphase aufgearbeitet und in die weitere Entwicklung der AR-App eingeflossen.

Research Pentagon 4 – Exkurs: Eye-Tracking: Das vierte Pentagon ist ein Exkurs und widmet sich der Frage, inwiefern sich Eye-Tracking zur quantitativen Erfassung motorischer Kompetenzen im Umgang mit Laborgeräten – insbesondere Oszilloskopen – eignet. Die Analyse erfolgt anhand mehrerer Verfahren: *Heatmaps*, *AOI-Zeit-Diagramme* sowie *Scanfadanalysen*. Dabei werden die Blickbewegungen unerfahrener Studierender mit denen erfahrener Laboringenieure verglichen.

Die Ergebnisse der Eye-Tracking-Studie zeigen keine klaren Unterschiede im Blickverhalten zwischen erfahrenen und unerfahrenen Nutzer:innen, was darauf hinweist, dass Blickverläufe eher von individuellen Lösungsstrategien der Probanden abhängen als von ihrem Erfahrungs niveau. Zwar lassen sich in den Scanpfadanalysen mit Hilfe der Clusterbildung Muster erkennen, jedoch ist die Trennschärfe zwischen den verschiedenen Erfahrungs niveaus begrenzt. Besonders sichtbar wird dies in den wiederkehrenden Blickwechseln zwischen verschiedenen Funktionsbereichen wie dem Trigger-Menü und den Skalierungseinstellungen, die unabhängig vom Erfahrungs niveau auftreten. Diese Blickverläufe lassen sich aufgrund der kurzen Dauer und der begrenzten räumlichen Auflösung des Eye-Trackers jedoch nur eingeschränkt interpretieren.

10.1.3 Abschnitt III: Summative Evaluation

Da sich Eye-Tracking in der vorherigen Studie als Messinstrument aufgrund methodischer und technischer Einschränkungen als ungeeignet erwiesen hat, erfolgt die Gesamtevaluation anhand eines Online-Tests in Kombination mit zwei Fragebögen. Der Moodle-basierte Online-Test prüft kognitive Aspekte wie Wissen, Verständnis, Analyse und Anwendung im Umgang mit Oszilloskopen, während die Fragebögen affektive Veränderungen, darunter das exp. Selbstkonzept, das Sachinteresse sowie empfundene Überforderung, erfassen. Zusätzlich werden die Bedienbarkeit (*Usability*) mittels des *System Usability Scale (SUS)* und die Nutzererfahrung (*User Experience*) über den UEQ der App bewertet.

An der Studie, die einem Prä-Posttest-Design mit einem Kontrollgruppenvergleich folgt, nehmen 70 Studierende zweier Universitäten teil, wobei für die Auswertung des Moodle-Tests nur die Daten von 58 Teilnehmenden berücksichtigt werden können. Beide Gruppen verbessern sich signifikant von Prä- zu Posttest.

Besonders stark sind die Verbesserungen auf den Taxonomiestufen *Anwendung* ($F = 29,93, \eta_p^2 = 0,35$), *Verständnis* ($F = 4,85, \eta_p^2 = 0,08$) und *Analyse* ($F = 4,15, \eta_p^2 = 0,07$), womit die Hypothese H1 bestätigt wird. Zwischen der Kontrollgruppe (KG) und Interventionsgruppe (IG) bestehen jedoch keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$), sodass kein Vorteil der AR-App gegenüber klassischen Materialien festgestellt werden kann (Falsifizierung von H2).

Auch affektive Merkmale verändern sich in beiden Gruppen positiv: Das exp. Selbstkonzept steigt leicht an von 3,67 auf 3,79 für die KG bzw. von 3,79 auf 3,94 für die IG (jeweils auf einer 5-stufigen Likert-Skala). Besonders deutlich

nimmt das exp. Sachinteresse zu, von anfangs durchschnittlich 3,02 auf 3,83 ($F = 75,48$, $\eta_p^2 = 0,56$), während die empfundene Überforderung gleichzeitig abnimmt ($F = 8,33$, $\eta_p^2 = 0,12$), womit Hypothese H3 bestätigt wird. Jedoch lassen sich wie beim kognitiven Wissenstest keine Unterschiede zwischen den beiden Gruppen feststellen, weshalb Hypothese H4 widerlegt wird.

Die Korrelationsanalysen bestätigen erwartungsgemäß, dass höhere Gesamtpunktzahlen im Wissenstest mit einem höheren exp. Selbstkonzept ($r = 0,64$; $p < 0,001$) sowie einer geringer empfundenen Überforderung ($r = -0,54$; $p < 0,001$) einhergehen.

Die abschließende App-Evaluation mittels SUS und UEQ ergibt, dass die Nutzerfreundlichkeit mit einem mittleren SUS-Wert von 65,1 als „akzeptabel“ bewertet wird, jedoch unter dem durchschnittlichen Benchmarkwert mobiler Anwendungen (73,6) liegt. Im UEQ zeigen sich besonders niedrige Werte in den Dimensionen Steuerbarkeit (0,76) und Effizienz (0,62; bei einer Skala von 0 bis 3). Als Ursachen nennen die Studierenden insbesondere die langsame Reaktionsgeschwindigkeit und die veraltete grafische Darstellung. Positiv hervorgehoben wird hingegen das Konzept einer virtuellen Laborumgebung zur Vorbereitung auf praktische Laborversuche.

10.2 Ausblick und Reflexion

Bereits im Jahr 2016, vor der eigentlichen Konzeptionierung und Entwicklung, hat sich abgezeichnet, dass der Einsatz von AR auf mobilen Endgeräten für die Vorbereitung auf Laborpraktika nur begrenzten didaktischen Mehrwert bietet. Die eingeschränkte Bildschirmgröße, die zweidimensionale Bedienoberfläche und die unpräzise Touch-Interaktion erschweren nicht nur die Darstellung komplexer Laborgeräte wie Oszilloskope, sondern beeinträchtigen auch die Immersion und Benutzungsfreundlichkeit. Die Steuerung dreidimensionaler Objekte durch Fingereingaben auf einem kleinen Bildschirm führt zwangsläufig zu Fehlbedienungen und Frustration, wie auch die Evaluationsergebnisse belegen. Reaktionsverzögerungen und die schwierige Interaktion mit Bedienelementen gehören zu den meistgenannten Kritikpunkten. Zwar greifen viele Studierende im Alltag bevorzugt auf mobile Endgeräte zurück, was für deren Einsatz im Lehrkontext spricht, doch rechtfertigt dieser Umstand nicht die vergleichsweise hohen Entwicklungsressourcen, zumal klassische Lernformate wie Videos oder Simulationen auf Computern oder Laptops ähnliche Lerneffekte erzielen.

Die in dieser Arbeit entwickelte mobile AR-App versteht sich vielmehr als notwendige Vorstufe für die Umsetzung in immersiven MR-Umgebungen. Während mobile Endgeräte in Funktionalität und Immersion limitiert sind, bieten moderne MR-Brillen ein erheblich erweitertes Interaktions- und Darstellungspotenzial. Infrastrukturelle Lösungen wie Poolräume mit MR-Brillen könnten zukünftig als flexible Lernorte dienen, an denen Studierende selbstständig experimentieren und sich auf Laborpraktika vorbereiten. Mit sinkenden Anschaffungskosten im Bereich von 200 € bis 1000 € und wachsender Verbreitung von Geräten und Anwendungen zeichnen sich bereits heute ähnliche Entwicklungen wie bei früheren Computertechnologien ab. Der Übergang von stationären, kostenintensiven VR-Systemen wie der *HTC Vive* hin zu autarken, benutzungsfreundlichen Geräten wie der *Meta Quest 3* oder der *Apple Vision Pro* verdeutlicht diesen Wandel. Diese Geräte ermöglichen freihändige Interaktionen, bieten lange Akkulaufzeiten und ein breiteres Sichtfeld.

Vor diesem Hintergrund erweist sich die Entscheidung für eine robuste und erweiterbare Architektur als richtig. Es ist von zentraler Bedeutung, dass didaktische Lehrmaßnahmen und Entwicklungen im Bereich AR nicht ausschließlich auf den aktuellen Stand der Technik ausgerichtet sind, sondern zukunftsorientiert konzipiert werden. Dies bedeutet vorwiegend, dass die gesamte Entwicklung den Prinzipien der Modularität, Plattformunabhängigkeit und konzeptueller Offenheit folgt. Eine sorgfältige Dokumentation der Entwicklung und Prozesse ermöglicht eine effiziente Anpassung an neue Technologien und didaktische Anforderungen.

Didaktische Offenheit und Anschlussfähigkeit: Das didaktische Konzept – basierend auf dem Constructive Alignment – ist mit seinen Lernzielen sowie den zugehörigen Aktivitäten so präzise, dass es sich innerhalb der App konkret umsetzen und im Rahmen einer Evaluation zuverlässig erfassen lässt. Gleichzeitig bleibt das Konzept medienunabhängig anschlussfähig: Die Lernziele sind so allgemein gehalten, dass sie sich flexibel auf andere Lehrformate übertragen lassen – etwa auf das reale Vorpraktikum im E-Labor der Fachschaft Elektrotechnik. Überdies umfasst das Konzept weitaus mehr Inhalte als in dieser Arbeit implementiert. Auch wenn der Fokus dieser App-Version ausschließlich auf dem Oszilloskop als Laborgerät liegt, berücksichtigt die didaktische Planung bewusst weitere Komponenten und Geräte der Elektrotechnik. Dadurch lässt sich die Maßnahme flexibel erweitern und bleibt auch ohne grundlegende Anpassungen am didaktischen Rahmen langfristig bestehen.

Modularität als strategisches Entwicklungsprinzip: Bereits in der Machbarkeitsstudie bildet ein modular aufgebautes Framework die Basis der App. Diese Struktur erleichtert nicht nur Wartung und Weiterentwicklung, sondern erlaubt auch eine schnelle Adaption auf verschiedene Plattformen. So gelingt die Portierung auf die Meta Quest 3 innerhalb weniger Monate; für andere Systeme wie die Pico oder Apple Vision Pro liegt die Entwicklungszeit sogar nur bei wenigen Wochen. Darüber hinaus existiert eine voll funktionsfähige PC-Version, die eine Eingabe per Tastatur und Maus ermöglicht und den Einsatz im Heimarbeitsplatz erlaubt.

Übertragbares Onboarding-Modul: Das für Unity3D entwickelte Tool zur Erstellung schrittweiser Anleitungen wirkt im Kontext der mobilen AR-App mit ihrem begrenzten Funktionsumfang zunächst überdimensioniert. In der Weiterentwicklung für MR-Brillen entfaltet es jedoch sein volles Potenzial. Die grafische Benutzeroberfläche erlaubt es, Schritt-für-Schritt-Anleitungen ohne Programmierkenntnisse effizient zu gestalten und flexibel anzupassen. Auf diese Weise lässt sich das Onboarding für die MR-Version in kurzer Zeit realisieren, um Nutzer:innen gezielt an neue Interaktionsformen wie Handtracking heranzuführen. Dieser wiederum leistet einen wesentlichen Beitrag zur Benutzerfreundlichkeit und zur Verbesserung der Nutzererfahrung. Eine begleitende Studie zum UI und dem empfundenen Nutzen des Onboardings in der MR-Version bestätigt diesen Mehrwert empirisch.

Eye-Tracking als Evaluationswerkzeug: Die Ergebnisse der Eye-Tracking-Studie zeigen, dass es als rein quantitatives Instrument zu kurz greift, um motorische Handlungskompetenzen valide und objektiv zu bewerten. Blickdaten reflektieren nicht nur Fähigkeitsunterschiede, sondern auch individuelle Lösungsstrategien und situative Bedingungen. Erst in Kombination mit qualitativen Daten, beispielsweise durch Interviews, lautem Denken oder Videobeobachtung, lassen sich fundierte Rückschlüsse auf Kompetenzentwicklung und Lernverhalten ziehen. Trotz der fehlenden Generalisierbarkeit der Aussagen liefert die Studie dennoch wertvolle Erkenntnisse und Erfahrungen über die visuelle Aufmerksamkeit und das Problemlöseverhalten am Oszilloskop. Das im Rahmen der Studie entwickelte Analysewerkzeug zur AOI-Definition, Heatmap-Visualisierung und Stringanalyse von Blickpfaden schafft eine gute Basis für zukünftige Forschung. Besonders relevant wird dieser Ansatz durch aktuelle technologische Entwicklungen, bei denen moderne Eye-Tracker nicht nur preiswerter sind, sondern Blickdaten präziser, mit kürzeren Latenzen und ohne aufwendige Kalibrierung erfassen.

Als Evaluationswerkzeug gewinnt es erneut an Bedeutung, da sie durch diese Entwicklungen bereits in vielen MR-Brillen, wie der Meta Quest 2 Pro, der Apple Vision oder der Microsoft HoloLens 2 standardmäßig integriert sind und damit die Durchführung einer großangelegten Wirksamkeitsstudie erheblich erleichtern. Perspektivisch eröffnen sich durch die Anbindung an KI-Systeme auch neue Wege für adaptive Lernumgebungen, die Blickverläufe analysieren und daraus individualisierte Hilfestellungen anbieten. Erste Kooperationsgespräche mit Forschungsgruppen zur Diagnostik von Fehlvorstellungen in der Elektrotechnik mittels MR und Eye-Tracking sind bereits initiiert.

Fazit: Die vorliegende Arbeit zeigt die Bedeutung auf, didaktische Lehrmaßnahmen nicht allein am aktuellen Stand der Technik auszurichten. Vielmehr sollten zukünftige Entwicklungen frühzeitig antizipiert und in die Konzeption einbezogen werden. Durch die modulare und technologieoffene Gestaltung bleibt eine Maßnahme langfristig anschlussfähig und flexibel gegenüber technologischen Neuerungen.

Gleichzeitig erfordert dieser Ansatz eine gewisse Offenheit für Anpassungen – einschließlich fundamentaler Änderungen oder sogar der vollständigen Aufgabe einzelner Entwicklungslinien. So ersetzt in dieser Arbeit die Nutzung von ARCore und ARKit die ursprünglich gewählte Entwicklungsumgebung Wikitude, da diese durch ihre Verbreitung, Stabilität und Leistungsfähigkeit überzeugender ist. Andere Entwicklungsansätze mittels dem *Google Cardboard* oder dem *Project Tango* sind durch die Einstellung der Plattformen vollständig aufgegeben worden.

Auch wenn die mobile AR-App im Vergleich zu klassischen Medien keinen unmittelbaren Mehrwert zeigt, legt sie den methodischen und technischen Grundstein für eine zukünftige, skalierbare und wirksame Erweiterung von Laborpraktika.

Literaturverzeichnis

- [AA17] Murat Akçayır und Gökcé Akçayır. **Advantages and Challenges Associated with Augmented Reality for Education: A Systematic Review of the Literature**. *Educational Research Review* 20 (2017), 1–11. (Besucht am 14. 03. 2017) (siehe S. 23, 32).
- [AFT25] Mesut Alptekin, Lennart Froese und Katrin Temmen. **Quantitative and Qualitative Literature Review of Augmented Reality in Teaching**. In: *Recent Trends of AI Technologies and Virtual Reality: Proceedings of 8th International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR 2024)*. Bd. 432. Springer Nature, 2025, 427. (Besucht am 06. 08. 2025) (siehe S. 31).
- [AK11] DQR AK. **Deutscher Qualifikationsrahmen für lebenslanges Lernen**. Techn. Ber. BMBF: Bundesministerium für Bildung und Forschung, Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder, März 2011, 21. (Besucht am 28. 05. 2019) (siehe S. 117).
- [Akç+16] Murat Akçayır, Gökcé Akçayır, Hüseyin Miraç Pektaş und Mehmet Akif Ocak. **Augmented Reality in Science Laboratories: The Effects of Augmented Reality on University Students' Laboratory Skills and Attitudes toward Science Laboratories**. *Computers in Human Behavior* 57:Supplement C (Apr. 2016), 334–342. ISSN: 0747-5632. DOI: [10.1016/j.chb.2015.12.054](https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.12.054). (Besucht am 04. 10. 2017) (siehe S. 33, VIII, X).
- [Alt+20] Kristin Altmeyer, Sebastian Kapp, Michael Thees, Sarah Malone, Jochen Kuhn und Roland Brünken. **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 (2020), 611–628. ISSN: 1467-8535. DOI: [10.1111/bjet.12900](https://doi.org/10.1111/bjet.12900). (Besucht am 05. 04. 2023) (siehe S. VIII, XI).
- [AMM11] Jose Manuel Andujar, Andrés Mejias und Marco Antonio Marquez. **Augmented Reality for the Improvement of Remote Laboratories: An Augmented Remote Laboratory**. *IEEE Transactions on Education* 54:3 (Aug. 2011), 492–500. ISSN: 0018-9359, 1557-9638. DOI: [10.1109/TE.2010.2085047](https://doi.org/10.1109/TE.2010.2085047). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. VIII, X).

- [APH20] Jiwoo An, Laila-Parvin Poly und Thomas A. Holme. **Usability Testing and the Development of an Augmented Reality Application for Laboratory Learning**. *Journal of Chemical Education* 97:1 (Jan. 2020), 97–105. ISSN: 0021-9584, 1938-1328. doi: [10.1021/acs.jchemed.9b00453](https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00453). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. [VIII](#), [XI](#)).
- [Arv+09] Theodoros N. Arvanitis, Argeroula Petrou, James F. Knight, Stavros Savas, Sofoklis Sotiriou, Michael Gargalakos und Elpida Gialouri. **Human Factors and Qualitative Pedagogical Evaluation of a Mobile Augmented Reality System for Science Education Used by Learners with Physical Disabilities**. *Personal and ubiquitous computing* 13:3 (2009), 243–250. (Besucht am 24. 04. 2017) (siehe S. [35](#)).
- [AT13] William Albert und Thomas Tullis. **Measuring the User Experience: Collecting, Analyzing, and Presenting Usability Metrics**. Newnes, 2013. ISBN: 978-0-12-415792-7 (siehe S. [118](#)).
- [AT17] Mesut Alptekin und Katrin Temmen. **Möglichkeiten und Grenzen von Virtual- und Augmented Reality im Laborpraktikum**. In: *Digitalisierung in der Techniklehre - ihr Beitrag zum Profil technischer Bildung - Wege zu technischer Bildung*. Bd. 12. 12. TU Ilmenau, Mai 2017, 91–98. ISBN: 978-3-9818728-1-1 (siehe S. [23](#), [49](#)).
- [AT18a] M. Alptekin und K. Temmen. **Design Concept and Prototype for an Augmented Reality Based Virtual Preparation Laboratory Training in Electrical Engineering**. In: *2018 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. Tenerife, Spain, Apr. 2018, 963–968. doi: [10.1109/EDUCON.2018.8363334](https://doi.org/10.1109/EDUCON.2018.8363334) (siehe S. [VIII](#), [X](#)).
- [AT18b] Mesut Alptekin und Katrin Temmen. **Gamification in an Augmented Reality Based Virtual Preparation Laboratory Training**. In: *International Conference on Interactive Collaborative Learning*. Springer, 2018, 567–578 (siehe S. [VIII](#), [XI](#)).
- [AT19] Mesut Alptekin und Katrin Temmen. **Teaching an Oscilloscope through Progressive Onboarding in an Augmented Reality Based Virtual Laboratory**. In: *2019 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. IEEE, 2019, 1047–1054 (siehe S. [VIII](#), [XI](#)).
- [ÁV21] Alejandro Álvarez-Marín und J. Ángel Velázquez-Iturbide. **Augmented Reality and Engineering Education: A Systematic Review**. *IEEE Transactions on Learning Technologies* 14:6 (Dez. 2021), 817–831. ISSN: 1939-1382. doi: [10.1109/TLT.2022.3144356](https://doi.org/10.1109/TLT.2022.3144356). (Besucht am 27. 06. 2024) (siehe S. [36](#)).

- [Avi+21] Cecilia Avila-Garzon, Jorge Bacca-Acosta, Kinshuk, Joan Duarte und Juan Betancourt. **Augmented Reality in Education: An Overview of Twenty-Five Years of Research**. *Contemporary Educational Technology* 13:3 (Apr. 2021), ep302. ISSN: 1309517X. doi: [10.30935/cedtech/10865](https://doi.org/10.30935/cedtech/10865). (Besucht am 14.02.2024) (siehe S. 36).
- [Bau+21] Anna B. Bauer, Marc D. Sacher, Sebastian Habig und Sabine Fechner. **Laborpraktika Auf Distanz**. *Ansätze in den Naturwissenschaften* (2021). (Besucht am 29.04.2025) (siehe S. 11).
- [Bau23] Anna Brigitte Bauer. **Experimentelle Kompetenz Physikstudierender: Entwicklung und erste Erprobung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells unter Nutzung qualitativer Methoden** / Anna Brigitte Bauer ; Gutachter: Prof. a. d. Dr. Peter Reinhold (Universität Paderborn), Prof. Dr. Josef Riese (RWTH Aachen). Diss. Paderborn: Universität Paderborn, 2023. (Besucht am 07.01.2025) (siehe S. 11–13, 112).
- [BCD89] John Seely Brown, Allan Collins und Paul Duguid. **Situated Cognition and the Culture of Learning**. 1989 18:1 (1989), 32–42. (Besucht am 06.02.2024) (siehe S. 43).
- [BDW16] John D. Blischak, Emily R. Davenport und Greg Wilson. **A Quick Introduction to Version Control with Git and GitHub**. *PLOS Computational Biology* 12:1 (Jan. 2016), e1004668. ISSN: 1553-7358. doi: [10.1371/journal.pcbi.1004668](https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004668). (Besucht am 23.04.2025) (siehe S. 82).
- [Ben+14] Jorge R. Lopez Benito, Enara Artetxe Gonzalez, Margarita Anastassova und Florent Souvestre. **Engaging Computer Engineering Students with an Augmented Reality Software for Laboratory Exercises**. In: *2014 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE) Proceedings*. Madrid, Spain: IEEE, Okt. 2014, 1–4. ISBN: 978-1-4799-3922-0. doi: [10.1109/FIE.2014.7044094](https://doi.org/10.1109/FIE.2014.7044094). (Besucht am 30.04.2024) (siehe S. VIII, X).
- [Ben15] Jason Bender. **All Aboard: Maximize Mobile Engagement with Interactive Onboarding**. *Online; codemag.com* Code Magazin 2015 - September/October (Sep. 2015). (Besucht am 12.04.2024) (siehe S. 91).
- [Ber+06] Enrico Bertini, Silvia Gabrielli, Stephen Kimani, Tiziana Catarci und Giuseppe Santucci. **Appropriating and Assessing Heuristics for Mobile Computing**. In: *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*. AVI '06. New York, NY, USA: ACM, 2006, 119–126. ISBN: 978-1-59593-353-9. doi: [10.1145/1133265.1133291](https://doi.org/10.1145/1133265.1133291). (Besucht am 04.12.2018) (siehe S. 92, 93).

- [Big12] John Biggs. **Enhancing Learning through Constructive Alignment.** *Enhancing the quality of learning: Dispositions, instruction, and learning processes* (2012), 117–136 (siehe S. 43, 44).
- [Bik19] Angelika Bikner-Ahsbahs. **The Research Pentagon: A Diagram with Which to Think about Research.** *Compendium for early career researchers in mathematics education* (2019), 153–180 (siehe S. 6, 7).
- [Bin+23] Izzul Fahmi Bin Shaharuddin, Vikram Kumar, Izanoordina Ahmad, Julie Roslita Rusli, Nor Hidayah Abdul Kahar und Kushsairy Abdul Kadir. **Augmented Reality Application for Lab Instruments.** In: *2023 IEEE 9th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)*. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, Okt. 2023, 320–324. ISBN: 979-8-3503-4338-0. doi: [10.1109/ICSIMA59853.2023.10373524](https://doi.org/10.1109/ICSIMA59853.2023.10373524). (Besucht am 30.04.2024) (siehe S. IX, XIII).
- [BKM08] Aaron Bangor, Philip T. Kortum und James T. Miller. **An Empirical Evaluation of the System Usability Scale.** *International Journal of Human-Computer Interaction* 24:6 (Juli 2008), 574–594. ISSN: 1044-7318, 1532-7590. doi: [10.1080/10447310802205776](https://doi.org/10.1080/10447310802205776). (Besucht am 25.02.2025) (siehe S. 94, 163).
- [Bla13] Christopher Blake. „Eye-Tracking: Grundlagen und Anwendungsfelder“ In: *Handbuch standardisierte Erhebungsverfahren in der Kommunikationswissenschaft*. Hrsg. von Wiebke Möhring und Daniela Schlütz. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, 367–387. ISBN: 978-3-531-18776-1. doi: [10.1007/978-3-531-18776-1_20](https://doi.org/10.1007/978-3-531-18776-1_20). (Besucht am 28.02.2019) (siehe S. 134).
- [Bla15] Mathias Blanz. **Forschungsmethoden und Statistik für die Soziale Arbeit: Grundlagen und Anwendungen.** Deutsch. Stuttgart: W. Kohlhammer GmbH, 2015. ISBN: 978-3-17-025835-8 (siehe S. 146–148).
- [Blo20] Benjamin S. ; Krathwohl Bloom. **Taxonomy of Educational Objectives : The Classification of Educational Goals. Book 1, Cognitive Domain.** Longman, Aug. 2020. (Besucht am 22.05.2023) (siehe S. 44, 48).
- [Blo56] Benjamin S. Bloom. **Taxonomy of Educational Objectives. Vol. 1: Cognitive Domain.** New York: McKay (1956), 20–24 (siehe S. 44).
- [BNL06] Moshe Bar, Maital Neta und Heather Linz. **Very First Impressions.** *Emotion* 6:2 (2006), 269–278. ISSN: 1931-1516, 1528-3542. doi: [10.1037/1528-3542.6.2.269](https://doi.org/10.1037/1528-3542.6.2.269). (Besucht am 04.12.2018) (siehe S. 87).

- [Böh+11] Matthias Böhmer, Brent Hecht, Johannes Schöning, Antonio Krüger und Gernot Bauer. **Falling Asleep with Angry Birds, Facebook and Kindle: A Large Scale Study on Mobile Application Usage**. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*. MobileHCI '11. New York, NY, USA: ACM, 2011, 47–56. ISBN: 978-1-4503-0541-9. DOI: [10.1145/2037373.2037383](https://doi.org/10.1145/2037373.2037383). (Besucht am 29.11.2018) (siehe S. 87).
- [BP99] Peter Baumgartner und Sabine Payr. **Lernen mit Software**. Innsbruck Wien München: Studien Verlag, Jan. 1999. ISBN: 978-3-7065-1444-6 (siehe S. 43).
- [BR00] Rainer Bromme und Riklef Rambow. **Experten-Laien-Kommunikation Als Gegenstand Der Expertiseforschung: Für Eine Erweiterung Des Psychologischen Bildes Vom Experten**. Bd. Bericht über den 42. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie. Jena: na, 2000. (Besucht am 12.05.2025) (siehe S. 117).
- [BS06] Hans-Jürgen Bucher und Peter Schumacher. **The Relevance of Attention for Selecting News Content. An Eye-Tracking Study on Attention Patterns in the Reception of Print and Online Media**. *Communications* 31:3 (2006), 347–368 (siehe S. 116).
- [BS11] Jürgen Bortz und Christof Schuster. **Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler: Limitierte Sonderausgabe**. de. Google-Books-ID: UhYjBAAAQBAJ. Springer-Verlag, Feb. 2011. ISBN: 978-3-642-12770-0 (siehe S. 145).
- [BWS96] Jeffrey B. Brookings, Glenn F. Wilson und Carolyne R. Swain. **Psychophysiological Responses to Changes in Workload during Simulated Air Traffic Control**. *Biological Psychology*. Psychophysiology of Workload 42:3 (Feb. 1996), 361–377. ISSN: 0301-0511. DOI: [10.1016/0301-0511\(95\)05167-8](https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05167-8). (Besucht am 29.05.2019) (siehe S. 135).
- [Cas+18] Nora Castner, Enkelejda Kasneci, Thomas Kübler, Katharina Scheiter, Julianne Richter, Thérèse Eder, Fabian Hüttig und Constanze Keutel. **Scanpath Comparison in Medical Image Reading Skills of Dental Students: Distinguishing Stages of Expertise Development**. In: *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*. ETRA '18. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Juni 2018, 1–9. ISBN: 978-1-4503-5706-7. DOI: [10.1145/3204493.3204550](https://doi.org/10.1145/3204493.3204550). (Besucht am 13.05.2025) (siehe S. 127, 128).

- [CDN88] J. P. Chin, V. A. Diehl und L. K. Norman. **Development of an Instrument Measuring User Satisfaction of the Human-Computer Interface**. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '88*. Washington, D.C., United States: ACM Press, 1988, 213–218. ISBN: 978-0-201-14237-2. doi: [10.1145/57167.57203](https://doi.org/10.1145/57167.57203). (Besucht am 25.02.2025) (siehe S. 94).
- [CGC20] Cuneyd Celik, Gokhan Guven und Nevin Kozcu Cakir. **Integration of Mobile Augmented Reality (MAR) Applications into Biology Laboratory: Anatomic Structure of the Heart**. *Research in Learning Technology* 28:0 (Feb. 2020). ISSN: 2156-7077. doi: [10.25304/rlt.v28.2355](https://doi.org/10.25304/rlt.v28.2355). (Besucht am 30.04.2024) (siehe S. VIII, XI).
- [CH17] Martin J. Crowder und David J. Hand. **Analysis of Repeated Measures**. New York: Routledge, Okt. 2017. ISBN: 978-1-315-13742-1. doi: [10.1201/9781315137421](https://doi.org/10.1201/9781315137421) (siehe S. 144).
- [Cha19] Pooja Chawla. *17 Mobile App Onboarding Best Practices to Follow in 2021*. Sep. 2019. (Besucht am 12.04.2024) (siehe S. 88, 89).
- [Che+24] Yufang Cheng, Meng-Han Lee, Chung-Sung Yang und Pei-Yu Wu. **Hands-on Interaction in the Augmented Reality (AR) Chemistry Laboratories Enhances the Learning Effects of Low-Achieving Students: A Pilot Study**. *Interactive Technology and Smart Education* 21:1 (Jan. 2024), 44–66. ISSN: 1741-5659, 1741-5659. doi: [10.1108/ITSE-04-2022-0045](https://doi.org/10.1108/ITSE-04-2022-0045). (Besucht am 30.04.2024) (siehe S. IX, XIII).
- [Chi06] Michelene T H Chi. **Two Approaches to the Study of Experts' Characteristics**. *the cambridge handbook of expertise and expert performance* (2006), 10 (siehe S. 117).
- [Chi20] Antonio Chiappetta. **Designing Effective User Onboarding Experiences for Mobile Applications**. Magisterarb. Piazza Leonardo da Vinci; 20133 Milano: Politecnico di Milano, Italy, Dez. 2020. (Besucht am 08.04.2024) (siehe S. 86).
- [Chu22] Yih Bing Chu. **A Mobile Augmented Reality System to Conduct Electrical Machines Laboratory for Undergraduate Engineering Students during the COVID Pandemic**. *Education and Information Technologies* 27:6 (Juli 2022), 8519–8532. ISSN: 1360-2357, 1573-7608. doi: [10.1007/s10639-022-10987-9](https://doi.org/10.1007/s10639-022-10987-9). (Besucht am 30.04.2024) (siehe S. IX, XII).
- [CL15] Ming-Puu Chen und Ban-Chieh Liao. **Augmented Reality Laboratory for High School Electrochemistry Course**. In: *2015 IEEE 15th International Conference on Advanced Learning Technologies*. Hualien, Taiwan: IEEE, Juli 2015, 132–136. ISBN: 978-1-4673-7334-0. doi: [10.1109/ICALT.2015.105](https://doi.org/10.1109/ICALT.2015.105). (Besucht am 30.04.2024) (siehe S. VIII, X).

- [CP13] Erika Corona und Filippo Eros Pani. **A Review of Lean-Kanban Approaches in the Software Development**. *WSEAS transactions on information science and applications* 10:1 (2013), 1–13. (Besucht am 23. 04. 2025) (siehe S. 83).
- [Cre99] John W. Creswell. „Mixed-Method Research: Introduction and Application“. In: *Handbook of Educational Policy*. Elsevier, 1999, 455–472. (Besucht am 29. 04. 2025) (siehe S. 23).
- [Cri+23] Jacob C Crislip, Esai Lopez, Cameron D Armstrong, Taylor Petell, Laila Abu-Lail und Andrew R Teixeira. **Enhancing Student Engagement in Unit Operations Laboratory through Augmented Reality**. 11:4 (2023) (siehe S. IX, XII).
- [CY18] Rong-Chi Chang und Zeng-Shiang Yu. **Using Augmented Reality Technologies to Enhance Students' Engagement and Achievement in Science Laboratories**. *International Journal of Distance Education Technologies* 16:4 (Dez. 2018), 19. ISSN: 1539-3100, 1539-3119. DOI: [10.4018/IJDET.2018100104](https://doi.org/10.4018/IJDET.2018100104) (siehe S. VIII, X).
- [DB16] Nicola Döring und Jürgen Bortz. **Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften**. 5. vollständig überarbeitete, aktualisierte und erweiterte Auflage. Springer-Lehrbuch. Berlin Heidelberg: Springer, 2016. ISBN: 978-3-642-41088-8 (siehe S. 113, 134).
- [DDM09] Matt Dunleavy, Chris Dede und Rebecca Mitchell. **Affordances and Limitations of Immersive Participatory Augmented Reality Simulations for Teaching and Learning**. *Journal of Science Education and Technology* 18:1 (2009), 7–22. (Besucht am 24. 04. 2017) (siehe S. 23, 93).
- [De +22] Andrea J. De Micheli, Thomas Valentin, Fabio Grillo, Manu Kapur und Simone Schuerle. **Mixed Reality for an Enhanced Laboratory Course on Microfluidics**. *Journal of Chemical Education* 99:3 (März 2022), 1272–1279. ISSN: 0021-9584, 1938-1328. DOI: [10.1021/acs.jchemed.1c00979](https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00979). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. IX, XII).
- [Dev18] Google Developer. *Android Versions Distribution Dashboard*. Okt. 2018. URL: <https://developer.android.com/about/dashboards/> (besucht am 12. 12. 2018) (siehe S. 95).
- [Dew+12] Richard Dewhurst, Marcus Nyström, Halszka Jarodzka, Tom Foulsham, Roger Johansson und Kenneth Holmqvist. **It Depends on How You Look at It: Scanpath Comparison in Multiple Dimensions with MultiMatch, a Vector-Based Approach**. *Behavior Research Methods* 44:4 (Dez. 2012), 1079–1100. ISSN: 1554-3528. DOI: [10.3758/s13428-012-0212-2](https://doi.org/10.3758/s13428-012-0212-2). (Besucht am 27. 02. 2019) (siehe S. 127, 128).

- [DIK13] Ángela Di Serio, María Blanca Ibáñez und Carlos Delgado Kloos. **Impact of an Augmented Reality System on Students' Motivation for a Visual Art Course**. *Computers & Education* 68 (2013), 586–596 (siehe S. 33).
- [Din+21] Furkan Dinc, Aryadeepa De, Ayanna Goins, Tansel Halic, Marsha Massey und Faith Yarberry. **ARChem: Augmented Reality Based Chemistry LAB Simulation for Teaching and Assessment**. In: *2021 19th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET)*. Sydney, Australia: IEEE, Nov. 2021, 1–7. ISBN: 978-1-7281-8883-6. doi: [10.1109/ITHET50392.2021.9759587](https://doi.org/10.1109/ITHET50392.2021.9759587). (Besucht am 30.04.2024) (siehe S. IX, XI).
- [Dom+22] Jessica Lizeth Domínguez Alfaro, Stefanie Gantois, Jonas Blattgerste, Robin De Croon, Katrien Verbert, Thies Pfeiffer und Peter Van Puyvelde. **Mobile Augmented Reality Laboratory for Learning Acid–Base Titration**. *Journal of Chemical Education* 99:2 (Feb. 2022), 531–537. ISSN: 0021-9584, 1938-1328. doi: [10.1021/acs.jchemed.1c00894](https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00894). (Besucht am 30.04.2024) (siehe S. IX, XII).
- [Dör23] Nicola Döring. **Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften**. 6. Aufl. Bd. 6. Berlin: Springer, Mai 2023. ISBN: 978-3-662-64761-5 (siehe S. 146, 148).
- [DR00] Edward L. Deci und Richard M. Ryan. **The "What" and "Why" of Goal Pursuits: Human Needs and the Self-Determination of Behavior**. *Psychological inquiry* 11:4 (2000), 227–268 (siehe S. 99).
- [Duc07] Andrew T. Duchowski. **Eye Tracking Methodology. Theory and practice** 328 (2007) (siehe S. 117, 119, 134).
- [Ech14] Joyce Echessa. *Improving Your App's Onboarding UX*. Aug. 2014. (Besucht am 28.11.2018) (siehe S. 88, 91, 92, 99, 111).
- [EKS16] Hans Joachim Eichler, Heinz-Detlef Kronfeldt und Jürgen Sahm. **Das neue Physikalische Grundpraktikum**. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN: 978-3-662-49022-8. doi: [10.1007/978-3-662-49023-5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-49023-5). (Besucht am 22.01.2024) (siehe S. 62–64).
- [Eul14] Dieter Euler. „Design Principles als Kristallisierungspunkt für Praxisgestaltung und wissenschaftliche Erkenntnisgewinnung“. In: *Design-based Research*. Hrsg. von Dieter Euler und Peter F. E. Sloane. Zeitschrift für Berufs- und Wirtschaftspädagogik Beiheft. Stuttgart: Steiner, 2014, 97–112 (siehe S. 3, 8).

- [EW19] Walter Edelmann und Simone Wittmann. **Lernpsychologie: Mit Online-Material**. 8. Aufl. Weinheim Basel: Beltz, Sep. 2019. ISBN: 978-3-621-28601-5 (siehe S. 54).
- [FA05] T.L.J. Ferris und Syed Aziz. **A Psychomotor Skills Extension to Bloom's Taxonomy of Education Objectives for Engineering Education**. Apr. 2005 (siehe S. 48).
- [Fer+15] J. Ferrer-Torregrosa, J. Torralba, M. A. Jimenez, S. García und J. M. Barcia. **ARBOOK: Development and Assessment of a Tool Based on Augmented Reality for Anatomy**. *Journal of Science Education and Technology* 24:1 (2015), 119–124 (siehe S. 32, 40).
- [FG98] John M. Findlay und Iain D. Gilchrist. „Chapter 13 - Eye Guidance and Visual Search“. In: *Eye Guidance in Reading and Scene Perception*. Hrsg. von Geoffrey Underwood. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, Jan. 1998, 295–312. ISBN: 978-0-08-043361-5. doi: [10.1016/B978-008043361-5/50014-6](https://doi.org/10.1016/B978-008043361-5/50014-6). (Besucht am 28. 05. 2019) (siehe S. 116).
- [Fie+22] Julia Fietz, Dorothee Pöhlchen, Florian P. Binder, BeCOME Working Group, Michael Czisch, Philipp G. Sämann und Victor I. Spoormaker. **Pupilometry Tracks Cognitive Load and Salience Network Activity in a Working Memory Functional Magnetic Resonance Imaging Task**. *Human Brain Mapping* 43:2 (Feb. 2022), 665–680. ISSN: 1065-9471, 1097-0193. doi: [10.1002/hbm.25678](https://doi.org/10.1002/hbm.25678). (Besucht am 12. 05. 2025) (siehe S. 119).
- [Fie13] Andy Field. **Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics**. Englisch. 4th Edition 4. New Delhi, India: SAGE Publications Ltd, Jan. 2013. ISBN: 978-93-5150-082-7 (siehe S. 144, 145, 156).
- [FJM05] Paul M. Fitts, Richard E. Jones und John L. Milton. **Eye Movements of Aircraft Pilots during Instrument-Landing Approaches**. *Ergonomics: Major Writings* (2005). (Besucht am 12. 05. 2025) (siehe S. 119).
- [FK17] Jared A. Frank und Vikram Kapila. **Mixed-Reality Learning Environments: Integrating Mobile Interfaces with Laboratory Test-Beds**. *Computers & Education* 110 (Juli 2017), 88–104. ISSN: 03601315. doi: [10.1016/j.compedu.2017.02.009](https://doi.org/10.1016/j.compedu.2017.02.009). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. VIII, X).
- [For02] Peter Forbrig. **Objektorientierte Softwareentwicklung Mit UML**. Fachbuchverlag, 2002. (Besucht am 21. 02. 2024) (siehe S. 61, 62, 66, 67).
- [Für19] Bärbel Fürstenau. **Lehr-Lern-Theorien: Behaviorismus, Kognitivismus, Konstruktivismus: Lernen und Expertise verstehen und fördern**. 2. korrigierte Auflage. Baltmannsweiler: Schneider Hohengehren, Sep. 2019. ISBN: 978-3-8340-1988-2 (siehe S. 41–43).

- [Gav+15] Nirit Gavish, Teresa Gutiérrez, Sabine Webel, Jorge Rodríguez, Matteo Peveri, Uli Bockholt und Franco Tecchia. **Evaluating Virtual Reality and Augmented Reality Training for Industrial Maintenance and Assembly Tasks**. *Interactive Learning Environments* 23:6 (2015), 778–798 (siehe S. 33).
- [Gei11] Stephanie Geise. **Eyetracking in Der Kommunikations- Und Mediawissenschaft: Theorie, Methode Und Kritische Reflexion**. *Studies in Communication / Media* 0:2 (2011), 149–263. ISSN: 21924007. DOI: [10.5771/2192-4007-2011-2-149](https://doi.org/10.5771/2192-4007-2011-2-149). (Besucht am 22. 10. 2018) (siehe S. 117).
- [Gei17] Ralf Geiß. „Didaktische Leitgedanken“. In: *Die Verwandlung der Stoffe*. Hrsg. von Ralf Geiß. Chemie – Entdecken und verstehen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017, 1–40. ISBN: 978-3-662-54708-3. DOI: [10.1007/978-3-662-54708-3_1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54708-3_1). (Besucht am 06. 02. 2024) (siehe S. 43, 44).
- [Gir92] Ellen R. Girden. **ANOVA: Repeated Measures**. en. Google-Books-ID: JomGKpjnfPcC. SAGE, 1992. ISBN: 978-0-8039-4257-8 (siehe S. 145).
- [GJW15] Bernard M. Garrett, Cathryn Jackson und Brian Wilson. **Augmented Reality M-Learning to Enhance Nursing Skills Acquisition in the Clinical Skills Laboratory**. *Interactive Technology and Smart Education* 12:4 (Nov. 2015), 298–314. ISSN: 1741-5659. DOI: [10.1108/ITSE-05-2015-0013](https://doi.org/10.1108/ITSE-05-2015-0013). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. VIII, X).
- [Gle+15] Mirjam Sophia Gleßmer, Sönke Knutzen, Peter Salden, Gabi Geringer, Viktoria Constanze Schneider, Alette Winter, Constanze Schneider, Alexander Tscheulin, Alina Gruhn, Siska Simon und Johannes Arlt. **Die Spannung steigern: Laborpraktika didaktisch gestalten**. *Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH) Am Schwarzenberg-Campus 3 (E) 21073 Hamburg*. 3 3:Zentrum für Lehre und Lernen (ZLL) (2015), 1–29 (siehe S. 11, 43).
- [Göt+11] Thomas Götz, Anne C. Frenzel, Markus Dresel und Reinhard Pekrun. **Emotion, Motivation und selbstreguliertes Lernen**. 1. Aufl. Paderborn: UTB GmbH, Apr. 2011. ISBN: 978-3-8252-3481-2 (siehe S. 35).
- [Gre89] James G. Greeno. **A Perspective on Thinking**. Bd. 44. American Psychological Association, 1989. (Besucht am 06. 02. 2024) (siehe S. 43).
- [Gua+23] Diana Guaya, Miguel Ángel Meneses, Ximena Jaramillo-Fierro und Eduardo Valarezo. **Augmented Reality: An Emergent Technology for Students' Learning Motivation for Chemical Engineering Laboratories during the COVID-19 Pandemic**. *Sustainability* 15:6 (März 2023), 5175. ISSN: 2071-1050. DOI: [10.3390/su15065175](https://doi.org/10.3390/su15065175). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. IX, XII).

- [GZ18] Richard J. Gerrig und Philip G. Zimbardo. **Psychologie**. Hallbergmoos/-Germany: Pearson Studium, Aug. 2018. ISBN: 978-3-86894-323-8 (siehe S. 42).
- [HA17] Kenneth Holmqvist und Richard Andersson. **Eye Tracking: A Comprehensive Guide to Methods**. *Paradigms and measures* 3 (2017), 5. (Besucht am 12. 05. 2025) (siehe S. 119).
- [Han+19] Anasse Hanafi, Lotfi Elaachak, Mohammed Bouhorma und El Khalil Bennis. **Safe Laboratory Practices & Procedures Introduced to the Students through an Augmented Reality Application**. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Smart City Applications*. Casablanca Morocco: ACM, Okt. 2019, 1–7. ISBN: 978-1-4503-6289-4. DOI: [10.1145/3368756.3369042](https://doi.org/10.1145/3368756.3369042). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. VIII, XI).
- [Har14] Aurora Harley. *Instructional Overlays and Coach Marks for Mobile Apps*. Feb. 2014. URL: <https://www.nngroup.com/articles/mobile-instructional-overlay/> (besucht am 04. 12. 2018) (siehe S. 53, 92).
- [Has20] Tristan Haselhuhn. **Zur Erfassung kognitiver Lernstrategien mit Blickbewegungen: experimentelle Untersuchungen mit Studierenden beim Textlernen**. Theorie und Forschung. Pädagogik Bd.968. Regensburg: S. Roderer Verlag, 2020. ISBN: 978-3-89783-919-9 (siehe S. 115, 116).
- [Hei16] Birte Heinemann. **Planung und Implementierung eines Experiment Builders für Usability Studien zu blickbasierter Interaktion**. Magisterarb. Paderborn: Universität Paderborn, Okt. 2016 (siehe S. 116).
- [Hel18] Volkhard Helms. **Softwarewerkzeuge Der Bioinformatik V2 Paarweises Sequenzalignment**. Vorlesungsskript. Okt. 2018 (siehe S. 128).
- [Hem25] Wanja A. Hemmerich. *ANOVA mit Messwiederholung: Voraussetzungen / StatistikGuru.de*. de. Blog. 2025. URL: <https://statistikguru.de/spss/rm-anova/voraussetzungen-3.html> (besucht am 30. 05. 2025) (siehe S. 145).
- [Her12] Erich Herber. **Augmented Reality–Auseinandersetzung Mit Realen Lernwelten**. *E-Learning allgegenwärtig*. Themenheft 3:2012 (2012), 7–13. (Besucht am 22. 03. 2017) (siehe S. 36).
- [Hes10] Whitney Hess. *Onboarding: Designing Welcoming First Experiences / UX Magazine*. Ux Magazine. Feb. 2010. URL: <http://uxmag.com/articles/onboarding-designing-welcoming-first-experiences> (besucht am 04. 12. 2018) (siehe S. 86–88, 93, 99).
- [Hey15] Frank Heyen. **Gruppierung von Eye-Tracking-Daten mittels geeigneter Ähnlichkeitsfunktionen** (2015). doi: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-9507>. (Besucht am 22. 10. 2018) (siehe S. 117, 118).

- [HG23] Felipe Hernández-Rodríguez und Nicia Guillén-Yparrea. **Competencies Development Strategy Using Augmented Reality for Self-Management of Learning in Manufacturing Laboratories (AR-ManufacturingLab)**. *Heliyon* 9:11 (Nov. 2023), e22072. ISSN: 24058440. DOI: [10.1016/j.heliyon.2023.e22072](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22072). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. IX, XII).
- [HK16] Thomas Hilfert und Markus König. **Low-Cost Virtual Reality Environment for Engineering and Construction**. *Visualization in Engineering* 4:1 (Dez. 2016). ISSN: 2213-7459. DOI: [10.1186/s40327-015-0031-5](https://doi.org/10.1186/s40327-015-0031-5). (Besucht am 15. 07. 2025) (siehe S. 2).
- [HKB08] Marc Hassenzahl, Franz Koller und Michael Burmester. **Der User Experience (UX) Auf Der Spur: Zum Einsatz von Www. Attrakdiff. De**. In: *Tagungsband UP08*. Fraunhofer Verlag, 2008, 78–82. (Besucht am 25. 02. 2025) (siehe S. 94).
- [HL17] Huei-Tse Hou und Ying-Chen Lin. **The Development and Evaluation of an Educational Game Integrated with Augmented Reality and Virtual Laboratory for Chemistry Experiment Learning**. In: *2017 6th IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI)*. Hamamatsu: IEEE, Juli 2017, 1005–1006. ISBN: 978-1-5386-0621-6. DOI: [10.1109/IIAI-AAI.2017.14](https://doi.org/10.1109/IIAI-AAI.2017.14). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. VIII, X).
- [HL93] Bert Hoeks und Willem J. M. Levelt. **Pupillary Dilation as a Measure of Attention: A Quantitative System Analysis**. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 25:1 (März 1993), 16–26. ISSN: 1532-5970. DOI: [10.3758/BF03204445](https://doi.org/10.3758/BF03204445). (Besucht am 29. 05. 2019) (siehe S. 135).
- [HNM12] Kenneth Holmqvist, Marcus Nyström und Fiona Mulvey. **Eye Tracker Data Quality: What It Is and How to Measure It**. In: *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications*. ACM, 2012, 45–52 (siehe S. 134).
- [Hof98] Robert R. Hoffman. „How Can Expertise Be Defined? Implications of Research from Cognitive Psychology“. In: *Exploring Expertise: Issues and Perspectives*. Hrsg. von Robin Williams, Wendy Faulkner und James Fleck. London: Palgrave Macmillan UK, 1998, 81–100. ISBN: 978-1-349-13693-3. DOI: [10.1007/978-1-349-13693-3_4](https://doi.org/10.1007/978-1-349-13693-3_4). (Besucht am 28. 05. 2019) (siehe S. 117).
- [Hol+11] Kenneth Holmqvist, Marcus Nyström, Richard Andersson, Richard Dewhurst, Halszka Jarodzka und Joost Van de Weijer. **Eye Tracking: A Comprehensive Guide to Methods and Measures**. OUP Oxford, 2011 (siehe S. 115).

- [Hon13] Nora Honken. **Dreyfus Five-Stage Model of Adult Skills Acquisition Applied to Engineering Lifelong Learning**. In: *2013 ASEE Annual Conference & Exposition*. 2013, 23–443. (Besucht am 12.05.2025) (siehe S. 117).
- [Hor23] Hornetsecurity. *Was ist eine Sandbox-Umgebung? Die Definition und der Anwendungsbereich von Sandboxen*. Nov. 2023. URL: <https://www.hornetsecurity.com/de/blog/sandbox-umgebung/> (besucht am 08.05.2025) (siehe S. 53).
- [HS18] Johannes Huwer und Johann Seibert. **A New Way to Discover the Chemistry Laboratory: The Augmented Reality Laboratory-License**. *World Journal of Chemical Education* 6:3 (Juni 2018), 124–128. ISSN: 2375-1665. DOI: [10.12691/wjce-6-3-4](https://doi.org/10.12691/wjce-6-3-4). (Besucht am 30.04.2024) (siehe S. VIII, X).
- [HSA23] Jona Hallmann, Carsten Stechert und Syed Imad-Uddin Ahmed. **SUPPORTING STUDENT LABORATORY EXPERIMENTS WITH AUGMENTED REALITY EXPERIENCE**. *Proceedings of the Design Society* 3 (Juli 2023), 3235–3244. ISSN: 2732-527X. DOI: [10.1017/pds.2023.324](https://doi.org/10.1017/pds.2023.324). (Besucht am 30.04.2024) (siehe S. IX, XIII).
- [Hub14] Brigitte Huber. „Experten als Untersuchungsgegenstand: Definitionen und Forschungsperspektiven“. In: *Öffentliche Experten: Über die Medienpräsenz von Fachleuten*. Hrsg. von Brigitte Huber. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, 23–39. ISBN: 978-3-658-05405-2. DOI: [10.1007/978-3-658-05405-2_2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-05405-2_2). (Besucht am 28.05.2019) (siehe S. 117).
- [Huc99] Lorenz Hücke. **Handlungsregulation und Wissenserwerb in traditionellen und computergestützten Experimenten des physikalischen Praktikums**. Berlin: Logos Berlin, März 1999. ISBN: 978-3-89722-316-5 (siehe S. 1).
- [ILM09] Ohad Inbar, Talia Lavie und Joachim Meyer. **Acceptable Intrusiveness of Online Help in Mobile Devices**. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services - MobileHCI '09*. Bonn, Germany: ACM Press, 2009, 1. ISBN: 978-1-60558-281-8. DOI: [10.1145/1613858.1613892](https://doi.org/10.1145/1613858.1613892). (Besucht am 27.11.2018) (siehe S. 92, 111).
- [Ino+13] Rodolfo Inostroza, Cristian Rusu, Silvana Roncagliolo und Virginica Rusu. **Usability Heuristics for Touchscreen-based Mobile Devices: Update**. In: *Proceedings of the 2013 Chilean Conference on Human - Computer Interaction*. ChileCHI '13. New York, NY, USA: ACM, 2013, 24–29. ISBN: 978-1-4503-2200-3. DOI: [10.1145/2535597.2535602](https://doi.org/10.1145/2535597.2535602). (Besucht am 04.12.2018) (siehe S. 92).

- [IR86] Albrecht Werner Inhoff und Keith Rayner. **Parafoveal Word Processing during Eye Fixations in Reading: Effects of Word Frequency**. *Perception & Psychophysics* 40:6 (Nov. 1986), 431–439. ISSN: 1532-5962. DOI: [10.3758/BF03208203](https://doi.org/10.3758/BF03208203). (Besucht am 28. 05. 2019) (siehe S. 116).
- [Ism+24] Ali Ismail, Demmy Dharma Bhakti, Lasmita Sari, Lula Dwi Kemalia und Saprudin Saprudin. **Development of an Augmented Reality Integrated Problem-Solving Laboratory Model (PSLab-AR) for Electricity Concepts to Enhance the Students' Understanding of Concepts**. *Momentum: Physics Education Journal* 8:1 (Jan. 2024), 1–10. ISSN: 2548-9135, 2548-9127. DOI: [10.21067/mpej.v8i1.9428](https://doi.org/10.21067/mpej.v8i1.9428). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. IX, XIII).
- [IST22] Ketut Ima Ismara, Faranita Surwi und Neneng Thoyyibah. **Development of Augmented Reality Based Occupational Health and Safety Guidebook in Electricity Basic Laboratory**. *International journal of health sciences* (Juli 2022), 11377–11395. ISSN: 2550-696X, 2550-6978. DOI: [10.5373/0/ijhs.v6nS5.11025](https://doi.org/10.5373/0/ijhs.v6nS5.11025). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. IX, XII).
- [JC80] Marcel A. Just und Patricia A. Carpenter. **A Theory of Reading: From Eye Fixations to Comprehension**. *Psychological Review* 87:4 (1980), 329–354. ISSN: 1939-1471(Electronic), 0033-295X(Print). DOI: [10.1037/0033-295X.87.4.329](https://doi.org/10.1037/0033-295X.87.4.329) (siehe S. 116).
- [JK03] Robert J. K. Jacob und Keith S. Karn. „Commentary on Section 4 - Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Ready to Deliver the Promises“. In: *The Mind's Eye*. Hrsg. von J. Hyönä, R. Radach und H. Deubel. Amsterdam: North-Holland, Jan. 2003, 573–605. ISBN: 978-0-444-51020-4. DOI: [10.1016/B978-044451020-4/50031-1](https://doi.org/10.1016/B978-044451020-4/50031-1). (Besucht am 28. 05. 2019) (siehe S. 116, 119).
- [Joy+16] Ger Joyce, Mariana Lilley, Trevor Barker und Amanda Jefferies. **Mobile Application Tutorials: Perception of Usefulness from an HCI Expert Perspective**. In: *Human-Computer Interaction. Interaction Platforms and Techniques*. Hrsg. von Masaaki Kurosu. Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, 2016, 302–308. ISBN: 978-3-319-39516-6 (siehe S. 92).
- [Kap+21] Sebastian Kapp, Michael Thees, Fabian Beil, Thomas Weatherby, Jan-Philipp Burde, Thomas Wilhelm und Jochen Kuhn. „Using Augmented Reality in an Inquiry-Based Physics Laboratory Course“. In: *Computer Supported Education*. Hrsg. von H. Chad Lane, Susan Zvacek und James Uhomobhi. Bd. 1473. Cham: Springer International Publishing, 2021, 177–198. ISBN: 978-3-030-86438-5. DOI: [10.1007/978-3-030-86439-2_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-86439-2_10). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. IX, XI).

- [Kap+22] Karmen Kapp, Mia Sivén, Patrick Laurén, Sonja Virtanen, Nina Katajajuuri und Ilona Södervik. **Design and Usability Testing of an Augmented Reality (AR) Environment in Pharmacy Education—Presenting a Pilot Study on Comparison between AR Smart Glasses and a Mobile Device in a Laboratory Course.** *Education Sciences* 12:12 (Nov. 2022), 854. ISSN: 2227-7102. doi: [10.3390/educsci12120854](https://doi.org/10.3390/educsci12120854). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. [IX](#), [XII](#)).
- [KC98] Jurek Kirakowski und Bozena Cierlik. **Measuring the Usability of Web Sites.** *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 42:4 (Okt. 1998), 424–428. ISSN: 1071-1813, 2169-5067. doi: [10.1177/154193129804200405](https://doi.org/10.1177/154193129804200405). (Besucht am 25. 02. 2025) (siehe S. [94](#)).
- [Kel24] Karin Kelley. *Unlocking the Power of Collaboration with Version Control and Git - Caltech*. Apr. 2024. (Besucht am 23. 04. 2025) (siehe S. [82](#)).
- [Ker99] Michael Kerres. **Didaktische Konzeption multimedialer und telemedialer Lernumgebungen.** HMD - Praxis der Wirtschaftsinformatik (1999) (siehe S. [39](#)).
- [Kir96] Jurek Kirakowski. **The Software Usability Measurement Inventory: Background and Usage.** *Usability evaluation in industry* (1996), 169–178. (Besucht am 25. 02. 2025) (siehe S. [94](#)).
- [Klö21] Sebastian Klöß. **Augmented und Virtual Reality.** Bitkom e.V. (2021) (siehe S. [22](#)).
- [KMB22] Michael Kerres, Miriam Mulders und Josef Buchner. **Virtuelle Realität: Immersion als Erlebnisdimension beim Lernen mit visuellen Informationen.** *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung* 47 (Apr. 2022), 312–330. ISSN: 1424-3636. doi: [10.21240/mpaed/47/2022.04.15.X](https://doi.org/10.21240/mpaed/47/2022.04.15.X). (Besucht am 05. 05. 2025) (siehe S. [36](#)).
- [KMD21] Amit Kumar, Archana Mantri und Rubina Dutta. **Development of an augmented reality-based scaffold to improve the learning experience of engineering students in embedded system course.** en. *Computer Applications in Engineering Education* 29:1 (2021). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/cae.22245>, 244–257. ISSN: 1099-0542. doi: [10.1002/cae.22245](https://doi.org/10.1002/cae.22245). URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cae.22245> (besucht am 03. 06. 2025) (siehe S. [163](#)).
- [KMK21] KMK. **Handreichung Für Die Erarbeitung von Rahmenlehrplänen Der Kultusministerkonferenz Für Den Berufsbezogenen Unterricht in Der Berufsschule Und Ihre Abstimmung Mit Ausbildungsordnungen Des Bundes Für Anerkannte Ausbildungsberufe.** Techn. Ber. Kultusministerkonferenz KMK, Juli 2021, 48 (siehe S. [117](#)).

- [Kom+08] Barbora Komíková, Marius Pedersen, Jon Y. Hardeberg und Marie Kaplavová. **Comparison of Eye Tracking Devices Used on Printed Images**. In: *Human Vision and Electronic Imaging XIII*. Bd. 6806. International Society for Optics and Photonics, Feb. 2008, 68061I. doi: [10.1117/12.766231](https://doi.org/10.1117/12.766231). (Besucht am 28. 05. 2019) (siehe S. 134).
- [Kön09] Anke König. **Interaktionsprozesse zwischen Erzieherinnen und Kindern**. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009. ISBN: 978-3-531-16134-1. doi: [10.1007/978-3-531-91412-1](https://doi.org/10.1007/978-3-531-91412-1). (Besucht am 02. 02. 2024) (siehe S. 43).
- [Kor22] Claudia Korthaus. **Grundkurs Grafik und Gestaltung: Fit für Studium und Ausbildung. Mit vielen Schritt-Anleitungen, Tipps und Tricks**. 5. Aufl. Bonn: Rheinwerk Design, Juli 2022. ISBN: 978-3-8362-9179-8 (siehe S. 42).
- [KOS11] Michael Kerres, Nadine Ojstersek und Jörg Stratmann. **Didaktische Konzeption von Angeboten Des Online-Lernens**. *Online-Lernen. Handbuch für Wissenschaft und Praxis* 2 (2011), 263–271. (Besucht am 29. 01. 2024) (siehe S. 39, 40).
- [Kra02] David R. Krathwohl. **A Revision of Bloom's Taxonomy: An Overview**. *Theory Into Practice* 41:4 (Nov. 2002), 212–218. ISSN: 0040-5841, 1543-0421. doi: [10.1207/s15430421tip4104_2](https://doi.org/10.1207/s15430421tip4104_2). (Besucht am 22. 05. 2023) (siehe S. 44).
- [KSd03] Michael Kerres, Jörg Stratmann und Claudia de Witt. **E-Learning. Didaktische Konzepte für erfolgreiches Lernen**. hrsg. von Schwuchow, Karlheiz & Guttmann, Joachim (2003) (siehe S. 39, 40).
- [KTP23] Nguyen Trong Khang, Ngoc-Huy Tran und Nguyen-Phuc-Quoc Phan. **Augmented Reality Application in Digital Automation Laboratory**. In: *2023 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE)*. Ho Chi Minh, Vietnam: IEEE, Okt. 2023, 133–138. ISBN: 979-8-3503-1548-6. doi: [10.1109/ISEE59483.2023.10299885](https://doi.org/10.1109/ISEE59483.2023.10299885). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. IX, XIII).
- [KW06] Andreas Krapp und Bernd Weidenmann. **Pädagogische Psychologie: Ein Lehrbuch**. 5. Aufl. Weinheim: Beltz, Aug. 2006. ISBN: 978-3-621-27564-4 (siehe S. 41).
- [Lev13] Wilfried Leven. **Blickverhalten von Konsumenten: Grundlagen, Messung und Anwendung in der Werbeforschung**. Springer-Verlag, März 2013. ISBN: 978-3-642-52390-8 (siehe S. 116).

- [Lic+21] Annalisa Liccardo, Pasquale Arpaia, Francesco Bonavolonta, Francesco De Pandi, Enzo Caputo, Rosario Schiano Lo Moriello und Antonio Gloria. **Augmented Reality Laboratory for Instrumentation and Measurements Online Course**. In: *2021 IEEE 6th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI)*. Naples, Italy: IEEE, Sep. 2021, 86–90. ISBN: 978-1-6654-4135-3. DOI: [10.1109/RTSI50628.2021.959734](https://doi.org/10.1109/RTSI50628.2021.959734) 6. (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. [IX](#), [XI](#)).
- [Lin+06] Gitte Lindgaard, Gary Fernandes, Cathy Dudek und J. Brown. **Attention Web Designers: You Have 50 Milliseconds to Make a Good First Impression!** *Behaviour & Information Technology* 25:2 (März 2006), 115–126. ISSN: 0144-929X. DOI: [10.1080/01449290500330448](https://doi.org/10.1080/01449290500330448). (Besucht am 04. 12. 2018) (siehe S. [87](#)).
- [LKL17] Kung Wong Lau, Chi Wai Kan und Pui Yuen LEE. **Doing Textiles Experiments in Game-Based Virtual Reality: A Design of the Stereoscopic Chemical Laboratory (SCL) for Textiles Education**. *The International Journal of Information and Learning Technology* 34:3 (2017). (Besucht am 20. 04. 2017) (siehe S. [1](#)).
- [LL22] Wolfgang Lenhard und Alexandra Lenhard. **Berechnung von Effektstärken**. *psychometrika*. Available: <https://www.psychometrica.de/effektstaerke.html#nntconv> [Accessed 3 Dec 2021] (2022). DOI: [10.13140/RG.2.2.17823.92329](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17823.92329). URL: <https://www.psychometrica.de/effektstaerke.html> (siehe S. [156](#), [158](#)).
- [Löw24] Melanie Löw. **Forschungsprojekt zu Lernsystemen: Eyetracking-Technik hilft, Lernprozesse zu verbessern**. *idw - Nachrichten Informationsdienst Wissenschaft* (Jan. 2024). (Besucht am 13. 05. 2025) (siehe S. [115](#)).
- [LP95] N. M. Lema und A. D. F. Price. **Benchmarking: Performance Improvement Toward Competitive Advantage**. *Journal of Management in Engineering* 11:1 (Jan. 1995), 28–37. ISSN: 0742-597X. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(1995\)11:1\(28\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(1995)11:1(28)). (Besucht am 25. 06. 2025) (siehe S. [103](#)).
- [LT10] Vincent Lunetta und Pinchas Tamir. **An Analysis of Laboratory Activities: Project Physics and PSSC**. *School Science and Mathematics* 81 (März 2010), 635–642. DOI: [10.1111/j.1949-8594.1981.tb11500.x](https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.1981.tb11500.x) (siehe S. [1](#)).
- [Mar+12] Jorge Martín-Gutiérrez, Peña Fabiani, M. Dolores Meneses-Fernández, David C. Pérez-López und Luis Abselán. **Adaptation of Electrical Laboratory Systems through Augmented Reality for Optimization of Engineering Teaching University**. *Eurographics 2012 - Education Papers* (2012), 6 pages. ISSN: 1017-4656. DOI: [10.2312/CONF/EG2012/EDUCATION/003-008](https://doi.org/10.2312/CONF/EG2012/EDUCATION/003-008). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. [VIII](#), [X](#)).

- [Mar+15] Jorge Martín-Gutiérrez, Peña Fabiani, Wanda Benesova, María Dolores Meneses und Carlos E. Mora. **Augmented Reality to Promote Collaborative and Autonomous Learning in Higher Education**. *Computers in Human Behavior*. Computing for Human Learning, Behaviour and Collaboration in the Social and Mobile Networks Era 51:Part B (Okt. 2015), 752–761. ISSN: 0747-5632. doi: [10.1016/j.chb.2014.11.093](https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.11.093). (Besucht am 10. 10. 2017) (siehe S. 33).
- [May+13] Dominik May, Claudio Terkowsky, Tobias Haertel und Christian Pleul. **The Laboratory in Your Hand Making Remote Laboratories Accessible through Mobile Devices**. In: *2013 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. März 2013, 335–344. doi: [10.1109/EduCon.2013.6530126](https://doi.org/10.1109/EduCon.2013.6530126). (Besucht am 14. 07. 2025) (siehe S. 11).
- [May+20] Dominik May, Brett Reeves, Mark Trudgen und Adel Alweshah. **The Remote Laboratory VISIR - Introducing Online Laboratory Equipment in Electrical Engineering Classes**. In: *2020 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*. Okt. 2020, 1–9. doi: [10.1109/FIE44824.2020.9274121](https://doi.org/10.1109/FIE44824.2020.9274121). (Besucht am 10. 07. 2025) (siehe S. 2).
- [May+23] Dominik May, Gustavo R. Alves, Alexander A. Kist und Susan M. Zvacek. „Online Laboratories in Engineering Education Research and Practice“. In: *International Handbook of Engineering Education Research*. Routledge, 2023, 525–552. (Besucht am 01. 09. 2025) (siehe S. 22).
- [MD14] Aliaksei Miniukovich und Antonella De Angeli. **Visual Impressions of Mobile App Interfaces**. In: *Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Fun, Fast, Foundational*. NordiCHI ’14. New York, NY, USA: ACM, 2014, 31–40. ISBN: 978-1-4503-2542-4. doi: [10.1145/2639189.2641219](https://doi.org/10.1145/2639189.2641219). (Besucht am 24. 10. 2018) (siehe S. 87, 88).
- [MH08] Russ Miles und Kim Hamilton. **Learning UML 2.0: A Pragmatic Introduction to UML**. O’Reilly Media, Inc., Dez. 2008. ISBN: 978-0-596-55522-1 (siehe S. 66, 68).
- [MK94] Paul Milgram und Fumio Kishino. **A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays**. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* 77:12 (1994), 1321–1329. (Besucht am 25. 04. 2017) (siehe S. 21).
- [MM99] Deborah J. Mayhew und Deborah Mayhew. **The Usability Engineering Lifecycle: A Practitioner’s Handbook for User Interface Design**. Morgan Kaufmann, Apr. 1999. ISBN: 978-1-55860-561-9 (siehe S. 107).

- [Müs+20] Jörg Müssig, Adrian Clark, Simon Hoermann, Giuseppe Loporcaro, Claudio Loporcaro und Tim Huber. **Imparting Materials Science Knowledge in the Field of the Crystal Structure of Metals in Times of Online Teaching: A Novel Online Laboratory Teaching Concept with an Augmented Reality Application.** *Journal of Chemical Education* 97:9 (Sep. 2020), 2643–2650. ISSN: 0021-9584, 1938-1328. doi: 10.1021/acs.jchem.ed.0c00763. (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. [IX](#), [XI](#)).
- [NA12] Gerd Nufer und Vanessa Ambacher. **Eye Tracking als Instrument der Werbeerfolgskontrolle.** Working Paper 2012-05. Reutlinger Diskussionsbeiträge zu Marketing & Management, 2012. (Besucht am 22. 10. 2018) (siehe S. [115](#)).
- [Nac16] VDI (Verein Deutsche Ingenieure) Nachrichten. **VDI Nachrichten.** *vdinachrichten.com* (2016), 29. (Besucht am 17. 06. 2017) (siehe S. [2](#), [15](#)).
- [Nad+20] Muhammad Nadeem, Amal Chandra, Audrey Livirya und Svetlana Berryozkina. **AR-LabOr: Design and Assessment of an Augmented Reality Application for Lab Orientation.** *Education Sciences* 10:11 (Nov. 2020), 316. ISSN: 2227-7102. doi: 10.3390/educsci10110316. (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. [IX](#), [XI](#)).
- [Nis22a] Nishadha. *Guidelines for UML Class Diagrams Part 1.* Blog. Mai 2022. (Besucht am 18. 04. 2024) (siehe S. [67](#), [68](#)).
- [Nis22b] Nishadha. *Guidelines for UML Class Diagrams Part 2.* Blog. Mai 2022. (Besucht am 18. 04. 2024) (siehe S. [67](#), [68](#)).
- [Nou+22] Mohamed Ismail Nounou, Heba A. Eassa, Kamila Orzechowski, Hadeer A. Eassa, Jerry Edouard, Nicole Stepak, Mohammad Khdeer, Mohammed Kalam, Diana Huynh, Eric Kwarteng, Kamilia H. A. Mohamed, Nada A. Helal, Nehal A. Ahmed, Ivan O. Edafiogho und Ola Ghoneim. **Mobile-Based Augmented Reality Application in Pharmacy Schools Implemented in Pharmaceutical Compounding Laboratories: Students' Benefits and Reception.** *Pharmacy* 10:4 (Juni 2022), 72. ISSN: 2226-4787. doi: 10.3390/pharmacy10040072. (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. [IX](#), [XII](#)).
- [NW06] David G. Novick und Karen Ward. **Why Don't People Read the Manual?** In: *Proceedings of SIGDOC 2006.* 2006. (Besucht am 29. 11. 2018) (siehe S. [53](#), [92](#)).
- [NW14] Matthias Nückles und Jörg Wittwer. **Lernen Und Wissenserwerb.** *Pädagogische Psychologie* 6 (2014), 225–252 (siehe S. [42](#)).

- [Ola+15] Jaisa Olasky, Ganesh Sankaranarayanan, Neal E. Seymour, J. Harvey Magee, Andinet Enquobahrie, Ming C. Lin, Rajesh Aggarwal, L. Michael Brunt, Steven D. Schwartzberg, Caroline G. L. Cao, Suvarnu De und Daniel B. Jones. **Identifying Opportunities for Virtual Reality Simulation in Surgical Education: A Review of the Proceedings from the Innovation, Design, and Emerging Alliances in Surgery (IDEAS) Conference: VR Surgery**. *Surgical innovation* 22:5 (Okt. 2015), 514–521. ISSN: 1553-3506. doi: [10.1177/1553350615583559](https://doi.org/10.1177/1553350615583559). (Besucht am 15. 11. 2016) (siehe S. 22).
- [Ole22] Lazebnyk Oleksandr. **Sales Forecasts Using CAGR: Advantages and Disadvantages**. *Management, Marketing Modern Problems in Science, Editorial Board* (2022), 272. (Besucht am 02. 07. 2025) (siehe S. 27).
- [Oss19] Carl von Ossietzky. **Oszilloskop und Funktionsgenerator**. Physik Skript. Universität Oldenburg, 2019 (siehe S. 63, 64).
- [PB06] Alex Poole und Linden J. Ball. „Eye Tracking in HCI and Usability Research“. In: *Encyclopedia of Human Computer Interaction*. IGI Global Scientific Publishing, 2006, 211–219. (Besucht am 12. 05. 2025) (siehe S. 119).
- [Pet20] Dominik Petko. **Einführung in die Mediendidaktik: Lehren und Lernen mit digitalen Medien**. 2. Auflage. Pädagogik. Weinheim Basel: Beltz, 2020. ISBN: 978-3-407-25810-6 (siehe S. 41–43).
- [Pla17] Elina Platova. **Optimierung eines Laborpraktikums durch kognitive Aktivierung**. Berlin: Logos Berlin, Juni 2017. ISBN: 978-3-8325-4481-2 (siehe S. 1).
- [Plu19] Kyle N. Plunkett. **A Simple and Practical Method for Incorporating Augmented Reality into the Classroom and Laboratory**. *Journal of Chemical Education* 96:11 (Nov. 2019), 2628–2631. ISSN: 0021-9584, 1938-1328. doi: [10.1021/acs.jchemed.9b00607](https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00607). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. VIII, XI).
- [Por] Jane Portman. *Chapter 5 of Fundamental UI Design - User Onboarding Essentials*. URL: <http://get.invisionapp.com/chapter-5-of-fundamental-ui-design> (besucht am 21. 11. 2018) (siehe S. 89, 99).
- [PRS03] Fred Paas, Alexander Renkl und John Sweller. **Cognitive Load Theory and Instructional Design: Recent Developments**. *Educational Psychologist* 38:1 (2003), 1–4. ISSN: 1532-6985. doi: [10.1207/S15326985EP3801_1](https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_1) (siehe S. 42).
- [PRS15] Jenny Preece, Yvonne Rogers und Helen Sharp. **Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction**. John Wiley & Sons, Mai 2015. ISBN: 978-1-119-02075-2 (siehe S. 93).

- [PSD23] Batulieu Muhammad Yoggi Prasty, Budiawanti Sri und Wahyuningsih Daru. **Development Of Physics Learning Media PHY-ART (Physics With Augmented Reality Technology) To Empower Student's Laboratory Skills.** 8:2 (2023) (siehe S. IX, XIII).
- [Rad16] Iulian Radu. **Exploring the Usability of Augmented Reality Interaction Techniques During Children's Early Elementary-School Years** (Aug. 2016). (Besucht am 14. 03. 2017) (siehe S. 23, 33).
- [Ray98] Keith Rayner. **Eye Movements in Reading and Information Processing: 20 Years of Research.** *Psychological Bulletin* 124:3 (1998), 51. ISSN: 372-422 0033-2909 (siehe S. 116).
- [RB21] Gabi Reinmann und Alexa Bräse. **Das Forschungsfünfeck Als Heuristik Für DBR Vorhaben.** *Impact Free - Hochschuldidaktisches Journal* 40 (2021) (siehe S. 6, 9).
- [Rei05] Gabi Reinmann. **Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung.** *Unterrichtswissenschaft* 33:1 (2005), 52–69. ISSN: 0340-4099. (Besucht am 29. 11. 2022) (siehe S. 8).
- [Rei11] Peter Reimann. „Design-Based Research“. In: *Methodological Choice and Design: Scholarship, Policy and Practice in Social and Educational Research*. Hrsg. von Lina Markauskaite, Peter Freebody und Jude Irwin. Methodos Series. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011, 37–50. ISBN: 978-90-481-8933-5. DOI: [10.1007/978-90-481-8933-5_3](https://doi.org/10.1007/978-90-481-8933-5_3). (Besucht am 30. 11. 2022) (siehe S. 6, 8).
- [Rei15] Gabi Reinmann. **Studentext Didaktisches Design.** Bd. 29. Universität Hamburg Hamburger Zentrum für Universitäres Lehren und Lernen: Universität Hamburg Hamburger Zentrum für Universitäres Lehren und Lernen | Leitung Professur für Lehren und Lernen an der Hochschule, 2015 (siehe S. 41, 43).
- [Ren+14] J. Renz, T. Staibitz, J. Pollak und C. Meinel. **Improving the Onboarding User Experience in MOOCs.** *EDULEARN14 Proceedings* (2014), 3931–3941. ISSN: 2340-1117. (Besucht am 08. 04. 2024) (siehe S. 87).
- [Rog+19] Rogerio da Silva, Bruno, Joao Hercilio Zuchi, Larson Kremer Vicente, Leonardo Ronald Perin Rauta, Mateus Bizzotto Nunes, Victor Augusto Schramm Pancracio und Watson Beck Junior. **AR Lab: Augmented Reality App for Chemistry Education.** In: *Why You Should(n't) Build Your Own Game Engine*. Bd. 15. Santiago de Chile: ACM, Juli 2019, 71–77. ISBN: 978-1-4503-6317-4. DOI: [10.1145/3306307.3328180](https://doi.org/10.1145/3306307.3328180). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. VIII, XI).

- [RS99] Matthew Rabin und Joel L. Schrag. **First Impressions Matter: A Model of Confirmatory Bias**. *The Quarterly Journal of Economics* 114:1 (Feb. 1999), 37–82. ISSN: 0033-5533. doi: [10.1162/00335539555945](https://doi.org/10.1162/00335539555945). (Besucht am 04. 12. 2018) (siehe S. 87).
- [RT06] Claudia Roda und Julie Thomas. **Attention Aware Systems: Theories, Applications, and Research Agenda**. *Computers in Human Behavior*. Attention Aware systemsSpecial Issue: Attention Aware Systems 22:4 (Juli 2006), 557–587. ISSN: 0747-5632. doi: [10.1016/j.chb.2005.12.005](https://doi.org/10.1016/j.chb.2005.12.005). (Besucht am 24. 04. 2017) (siehe S. 36).
- [RW18] Günter Daniel Rey und Karl F. Wender. **Neuronale Netze: Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung**. 3., aktualisierte und ergänzte Edition. Bern: Hogrefe AG, Apr. 2018. ISBN: 978-3-456-85796-1 (siehe S. 42).
- [SA16] Fatih Saltan und Ömer Arslan. **The Use of Augmented Reality in Formal Education: A Scoping Review**. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education* 13:2 (Dez. 2016), 503–520. ISSN: 1305-8215, 1305-8223. doi: [10.12973/eurasia.2017.00628a](https://doi.org/10.12973/eurasia.2017.00628a). (Besucht am 11. 10. 2017) (siehe S. 32).
- [SA24] Gurjinder Singh und Faizan Ahmad. **An Interactive Augmented Reality Framework to Enhance the User Experience and Operational Skills in Electronics Laboratories**. *Smart Learning Environments* 11:1 (Jan. 2024), 5. ISSN: 2196-7091. doi: [10.1186/s40561-023-00287-1](https://doi.org/10.1186/s40561-023-00287-1). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. 34, 36, IX, XIII).
- [Sai13] Travis Said. *First Time User Experiences in Mobile Apps* / Krystal Higgins. Aug. 2013. (Besucht am 29. 11. 2018) (siehe S. 88, 111).
- [Sat14] Germaine Satia. *Mobile Onboarding: A Beginner's Guide*. Nov. 2014. URL: <https://www.smashingmagazine.com/2014/08/mobile-onboarding-beginners-guide/> (besucht am 29. 11. 2018) (siehe S. 87, 89–92).
- [SB20] Marc D. Sacher und Anna B. Bauer. **Kompetenzförderung Im Laborpraktikum**. *Labore in der Hochschullehre* (2020), 51 (siehe S. 12).
- [SBS94] John A. Stern, Donna Boyer und David Schroeder. **Blink Rate: A Possible Measure of Fatigue**. *Human Factors* 36:2 (Juni 1994), 285–297. ISSN: 0018-7208. doi: [10.1177/001872089403600209](https://doi.org/10.1177/001872089403600209). (Besucht am 29. 05. 2019) (siehe S. 134, 135).
- [Sch09] Rolf Schulmeister. **Grundlagen hypermedialer Lernsysteme: Theorie - Didaktik - Design**. 4. Aufl. De Gruyter Oldenbourg, Dez. 2009. ISBN: 978-3-486-59409-6. (Besucht am 02. 02. 2024) (siehe S. 41).

- [Sch18] Dr Martin Schrepp. **User Experience Questionnaire Handbook**: Version 6 (Sep. 2018), 15 (siehe S. 86, 95, 96, 101).
- [SG00] Dario D. Salvucci und Joseph H. Goldberg. **Identifying Fixations and Saccades in Eye-tracking Protocols**. In: *Proceedings of the 2000 Symposium on Eye Tracking Research & Applications*. ETRA '00. New York, NY, USA: ACM, 2000, 71–78. ISBN: 978-1-58113-280-9. doi: [10.1145/355017.355028](https://doi.org/10.1145/355017.355028). (Besucht am 19. 10. 2018) (siehe S. 119).
- [SG15] Philip Sedgwick und Nan Greenwood. **Understanding the Hawthorne Effect**. *Bmj* 351 (Sep. 2015). doi: [10.1136/bmj.h4672](https://doi.org/10.1136/bmj.h4672). (Besucht am 12. 05. 2025) (siehe S. 134).
- [SGV18] Brendan Strahm, Colin M. Gray und Mihaela Vorvoreanu. **Generating Mobile Application Onboarding Insights Through Minimalist Instruction**. In: *Proceedings of the 2018 Designing Interactive Systems Conference*. DIS '18. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Juni 2018, 361–372. ISBN: 978-1-4503-5198-0. doi: [10.1145/3196709.3196727](https://doi.org/10.1145/3196709.3196727). (Besucht am 08. 04. 2024) (siehe S. 88).
- [Sig+16] Stephan Sigg, Eemil Lagerspetz, Ella Peltonen, Petteri Nurmi und Sasu Tarkoma. *Sovereignty of the Apps: There's More to Relevance than Downloads*. Nov. 2016. doi: [10.48550/arXiv.1611.10161](https://doi.org/10.48550/arXiv.1611.10161). arXiv: [1611.10161 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1611.10161). (Besucht am 01. 09. 2025) (siehe S. 84).
- [Sin+19] Gurjinder Singh, Archana Mantri, Ojaswa Sharma, Rubina Dutta und Rashpinder Kaur. **Evaluating the Impact of the Augmented Reality Learning Environment on Electronics Laboratory Skills of Engineering Students**. *Computer Applications in Engineering Education* 27:6 (2019), 1361–1375. ISSN: 1099-0542. doi: [10.1002/cae.22156](https://doi.org/10.1002/cae.22156). (Besucht am 14. 03. 2023) (siehe S. 33, 34, 36, VIII, XI).
- [Sin+21] Gurjinder Singh, Archana Mantri, Ojaswa Sharma und Rashpinder Kaur. **Virtual Reality Learning Environment for Enhancing Electronics Engineering Laboratory Experience**. *Computer Applications in Engineering Education* 29:1 (2021), 229–243. ISSN: 1099-0542. doi: [10.1002/cae.2233](https://doi.org/10.1002/cae.2233). (Besucht am 14. 03. 2023) (siehe S. 33).
- [SK14] Tina Seidel und Andreas Krapp. **Pädagogische Psychologie**. Weinheim: Beltz, Juli 2014. ISBN: 978-3-621-27917-8 (siehe S. 42).
- [Sku+16] Alexander Skulmowski, Simon Pradel, Tom Kühnert, Guido Brunnett und Günter Daniel Rey. **Embodied Learning Using a Tangible User Interface: The Effects of Haptic Perception and Selective Pointing on a Spatial Learning Task**. *Computers & Education* 92–93 (Jan. 2016), 64–75. ISSN: 0360-1315. doi: [10.1016/j.compedu.2015.10.011](https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.10.011). (Besucht am 24. 04. 2017) (siehe S. 35).

- [SL16] Jeff Sauro und James R. Lewis. **Quantifying the User Experience: Practical Statistics for User Research.** en. Google-Books-ID: USPfCQAAQ-BAJ. Morgan Kaufmann, Juli 2016. ISBN: 978-0-12-802548-2 (siehe S. 94, 146).
- [Söd+21] Ilona Södervik, Nina Katajavuori, Karmen Kapp, Patrick Laurén, Monica Aeijmelaeus und Mia Sivén. **Fostering Performance in Hands-On Laboratory Work with the Use of Mobile Augmented Reality (AR) Glasses.** *Education Sciences* 11:12 (Dez. 2021), 816. ISSN: 2227-7102. doi: 10.3390/educsci11120816. (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. IX, XI).
- [Sto23] Herbert Stocker. *Angewandte Ökonometrie: Methoden der Empirischen Wirtschaftsforschung. Unterlagen zur Ökonometrie I.* De. Vorlesungsunterlagen. https://www.uibk.ac.at/econometrics/einf/tab_f_stat.pdf, 2023. URL: https://www.uibk.ac.at/econometrics/einf/tab_f_stat.pdf (siehe S. LXVI).
- [Str+18] M P Strzys, S Kapp, M Thees, P Klein, P Lukowicz, P Knierim, A Schmidt und J Kuhn. **Physics Holo.Lab Learning Experience: Using Smartglasses for Augmented Reality Labwork to Foster the Concepts of Heat Conduction.** *European Journal of Physics* 39:3 (Mai 2018), 035703. ISSN: 0143-0807, 1361-6404. doi: 10.1088/1361-6404/aaa8fb. (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. VIII, X).
- [Str22] Marko Strizic. *4 Types of Mobile App Onboarding to Know About.* Blog. Juni 2022. URL: <https://decode.agency/article/types-of-mobile-app-onboarding/> (besucht am 12. 04. 2024) (siehe S. 88–90).
- [SW22] Mario Schmiedebach und Claas Wegner. **Design-Based Research als Ansatz zur Lösung praxisrelevanter Probleme in der fachdidaktischen Forschung** (Jan. 2022). doi: 10.25656/01:23920. (Besucht am 30. 11. 2022) (siehe S. 8).
- [Tek+16] Tekkaya, A. Erman, Uwe Wilkesmann, Claudio Terkowsky, Christian Pleul, Monika Radtke und Frauke Maevus. **Das Labor in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung: Zukunftsorientierte Ansätze aus dem Projekt IngLab.** Herbert Utz Verlag, Sep. 2016. ISBN: 978-3-8316-4499-5 (siehe S. 1, 2).
- [The+20] Michael Thees, Sebastian Kapp, Martin P. Strzys, Fabian Beil, Paul Lukowicz und Jochen Kuhn. **Effects of Augmented Reality on Learning and Cognitive Load in University Physics Laboratory Courses.** *Computers in Human Behavior* 108 (Juli 2020), 106316. ISSN: 0747-5632. doi: 10.1016/j.chb.2020.106316. (Besucht am 14. 03. 2023) (siehe S. IX, XI).

- [The+22] Michael Thees, Kristin Altmeyer, Sebastian Kapp, Eva Rexigel, Fabian Beil, Pascal Klein, Sarah Malone, Roland Brünken und Jochen Kuhn. **Augmented Reality for Presenting Real-Time Data During Students' Laboratory Work: Comparing a Head-Mounted Display With a Separate Display**. *Frontiers in Psychology* 13 (März 2022), 804742. ISSN: 1664-1078. doi: [10.3389/fpsyg.2022.804742](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.804742). (Besucht am 30.04.2024) (siehe S. [IX](#), [XII](#)).
- [The23] Thomas Theis. **Einstieg in Unity: Schritt für Schritt zum eigenen Computerspiel. Ideal für Programmieranfänger ohne Vorwissen. Mit 18 Beispiel-Games**. 4. Aufl. Bonn: Rheinwerk Computing, Apr. 2023. ISBN: 978-3-8362-9264-1 (siehe S. [61](#)).
- [TKS14] Patricia Tanner, Carly Karas und Damian Schofield. **Augmenting a Child's Reality: Using Educational Tablet Technology**. *J. Inf. Technol. Educ. Innovations Pract. (JITE)* 13 (2014), 45–54 (siehe S. [32](#), [40](#)).
- [TMF20] Claudius Terkowsky, Dominik May und Silke Frye. **Forschendes Lernen Im Labor: Labordidaktische Ansätze Zwischen Hands-on Und Cross-Reality**. *Labore in der Hochschullehre* 13 (2020). (Besucht am 14.07.2025) (siehe S. [1](#), [12](#), [13](#)).
- [Tuc+12] Alexandre N. Tuch, Eva Presslaber, Markus Stoecklin, Klaus Opwis und Javier Bargas-Avila. **The Role of Visual Complexity and Prototypicality Regarding First Impression of Websites: Working towards Understanding Aesthetic Judgments**. *International Journal of Human-Computer Studies* 70(11) (2012), 794–811. (Besucht am 24.10.2018) (siehe S. [87](#)).
- [Tul+22] Neha Tuli, Gurjinder Singh, Archana Mantri und Shivam Sharma. **Augmented Reality Learning Environment to Aid Engineering Students in Performing Practical Laboratory Experiments in Electronics Engineering**. *Smart Learning Environments* 9:1 (Aug. 2022), 26. ISSN: 2196-7091. doi: [10.1186/s40561-022-00207-9](https://doi.org/10.1186/s40561-022-00207-9). (Besucht am 30.04.2024) (siehe S. [IX](#), [XII](#)).
- [TW13] Lucia Tokárová und Melius Weideman. **Understanding the Process of Learning Touch-Screen Mobile Applications**. In: *Proceedings of the 31st ACM International Conference on Design of Communication - SIGDOC '13*. Greenville, North Carolina, USA: ACM Press, 2013, 157. ISBN: 978-1-4503-2131-0. doi: [10.1145/2507065.2507066](https://doi.org/10.1145/2507065.2507066). (Besucht am 27.11.2018) (siehe S. [49](#), [92](#)).
- [VC81] Lev Semenovich Vygotskij und Michael Cole. **Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes**. Nachdr. Cambridge, Mass.: Harvard Univ. Press, 1981. ISBN: 978-0-674-57629-2 (siehe S. [42](#)).

- [Vel+05] Boris M. Velichkovsky, Markus Joos, Jens R. Helmert und Sebastian Pan-
nasch. **Two Visual Systems and Their Eye Movements: Evidence from Static and Dynamic Scene Perception**. In: *Proceedings of the XXVII Conference of the Cognitive Science Society*. Bd. 1. Mahwah, NJ., 2005, 2005. (Besucht am 09. 05. 2025) (siehe S. 116).
- [Vil+22] Ana Villanueva, Zhengzhe Zhu, Ziyi Liu, Feiyang Wang, Subramanian Chidambaram und Karthik Ramani. **ColabAR: A Toolkit for Remote Collaboration in Tangible Augmented Reality Laboratories**. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction* 6:CSCW1 (März 2022), 1–22. ISSN: 2573-0142. doi: [10.1145/3512928](https://doi.org/10.1145/3512928). (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. IX, XII).
- [Voß10] Adrian Voßkühler. **Blickbewegungsmessung an Versuchsaufbauten**. Diss. 2010 (siehe S. 117, 127).
- [Wal24] Björn Walther. *Gemischte ANOVA in SPSS rechnen und interpretieren*. de. März 2024. URL: <https://bjoernwalther.com/gemischte-anova-in-spss-rechnen-und-interpretieren/> (besucht am 27. 02. 2025) (siehe S. 144).
- [Wat13] John B. Watson. **Psychology as the Behaviorist Views It**. *Psychological review* 20:2 (1913), 158 (siehe S. 41).
- [Way25] Rick Wayman. *What Compound Annual Growth Rate (CAGR) Tells Investors*. Apr. 2025. URL: <https://www.investopedia.com/investing/compound-annual-growth-rate-what-you-should-know/> (besucht am 02. 07. 2025) (siehe S. 27).
- [WCP21] Wanwisa Wattanasin, Pinanta Chatwattana und Pallop Piriyasurawong. **Engineering Project-Based Learning Using a Virtual Laboratory and Mixed Reality to Enhance Engineering and Innovation Skills** (2021) (siehe S. IX, XII).
- [Wel+98] Manuela Welzel, Kerstin Haller, Milena Bandiera, Dorte Hammelev, Panagiotis Koumaras, Hans Niedderer, Albert Paulsen, Karine Robinault und Stefan von Aufschnaiter. **Ziele, Die Lehrende Mit Dem Experimentieren in Der Naturwissenschaftlichen Ausbildung Verbinden – Ergebnisse Einer Europäischen Umfrage**. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 4:1 (1998), 29–44 (siehe S. 12).
- [Wie+12] Stefan M. Wierda, Hedderik van Rijn, Niels A. Taatgen und Sander Martens. **Pupil Dilation Deconvolution Reveals the Dynamics of Attention at High Temporal Resolution**. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109:22 (Mai 2012), 8456–8460. ISSN: 0027-8424, 1091-6490. doi: [10.1073/pnas.1201858109](https://doi.org/10.1073/pnas.1201858109). (Besucht am 29. 05. 2019) (siehe S. 135).

- [Wil16] Leslie Owen Wilson. **Anderson and Krathwohl Bloom's Taxonomy Revised - Understanding the New Version of Bloom's Taxonomy**. Quincy College, Quincy, Plymouth & Online (2016). (Besucht am 02. 06. 2024) (siehe S. 44, 45).
- [WKS09] Hartmut Wandke, Saskia Kain und Doreen Struve. **Mensch & Computer 2009: 9. fachübergreifende Konferenz für interaktive und koooperative Medien - Grenzenlos frei**. München: Oldenbourg Verlag, 2009. ISBN: 978-3-486-59855-1. doi: 10.1524/9783486598551. (Besucht am 20. 11. 2018) (siehe S. 94).
- [WSO22] Caroline Wermann, Beatrice Schlegel und Stefan Odenbach. **Entwicklung und Auswertung der Evaluation von Praktika@ home. Lessons Learned** 2:2 (2022). URL: <https://ll.journals.qucosa.de/ll/article/view/62> (besucht am 28. 05. 2025) (siehe S. 137).
- [Wu+13] Hsin-Kai Wu, Silvia Wen-Yu Lee, Hsin-Yi Chang und Jyh-Chong Liang. **Current Status, Opportunities and Challenges of Augmented Reality in Education**. *Computers & Education* 62 (2013), 41–49. (Besucht am 22. 03. 2017) (siehe S. 23, 33, 35, 93).
- [XW19] Yu Xiao und Maria Watson. **Guidance on Conducting a Systematic Literature Review**. *Journal of Planning Education and Research* 39:1 (März 2019), 93–112. ISSN: 0739-456X. doi: 10.1177/0739456X17723971. (Besucht am 29. 04. 2025) (siehe S. 24).
- [Yaz+20] Liubov Yazykova, Inna Muzyleva, Alina Gorlach und Yakov Gorlach. **Laboratory for Electrical Engineering Using Mixed Reality**. In: *2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. Lipetsk, Russia: IEEE, Nov. 2020, 663–668. ISBN: 978-1-7281-8840-9. doi: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280808. (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. IX, XI).
- [ZC11] Gabe Zichermann und Christopher Cunningham. **Gamification by Design: Implementing Game Mechanics in Web and Mobile Apps**. "O'Reilly Media, Inc.", 2011 (siehe S. 86).
- [Zhu+18] Bolin Zhu, Mi Feng, Hannah Lowe, Jeffrey Kesselman, Lane Harrison und Robert E. Dempski. **Increasing Enthusiasm and Enhancing Learning for Biochemistry-Laboratory Safety with an Augmented-Reality Program**. *Journal of Chemical Education* 95:10 (Okt. 2018), 1747–1754. ISSN: 0021-9584, 1938-1328. doi: 10.1021/acs.jchemed.8b00116. (Besucht am 30. 04. 2024) (siehe S. VIII, X).
- [Zor20] Mariana Zorkina. *Some Thoughts on Regular Expressions*. Sep. 2020. (Besucht am 14. 05. 2025) (siehe S. 131).

Eigene Publikationen

- [AFT25] Mesut Alptekin, Lennart Froese und Katrin Temmen. **Quantitative and Qualitative Literature Review of Augmented Reality in Teaching**. In: *Recent Trends of AI Technologies and Virtual Reality: Proceedings of 8th International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR 2024)*. Bd. 432. Springer Nature, 2025, 427. (Besucht am 06.08.2025).
- [AT17] Mesut Alptekin und Katrin Temmen. **Möglichkeiten und Grenzen von Virtual- und Augmented Reality im Laborpraktikum**. In: *Digitalisierung in der Techniklehre - ihr Beitrag zum Profil technischer Bildung - Wege zu technischer Bildung*. Bd. 12. 12. TU Ilmenau, Mai 2017, 91–98. ISBN: 978-3-9818728-1-1.
- [AT18a] M. Alptekin und K. Temmen. **Design Concept and Prototype for an Augmented Reality Based Virtual Preparation Laboratory Training in Electrical Engineering**. In: *2018 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. Tenerife, Spain, Apr. 2018, 963–968. DOI: [10.1109/EDUCON.2018.8363334](https://doi.org/10.1109/EDUCON.2018.8363334).
- [AT18b] Mesut Alptekin und Katrin Temmen. **Gamification in an Augmented Reality Based Virtual Preparation Laboratory Training**. In: *International Conference on Interactive Collaborative Learning*. Springer, 2018, 567–578.
- [AT19] Mesut Alptekin und Katrin Temmen. **Teaching an Oscilloscope through Progressive Onboarding in an Augmented Reality Based Virtual Laboratory**. In: *2019 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. IEEE, 2019, 1047–1054.
- [AT20] Mesut Alptekin und Katrin Temmen. **Measuring Students' Device Specific Competencies Using an Eye-Tracking Study on Oscilloscopes**. In: *The Impact of the 4th Industrial Revolution on Engineering Education*. Springer, Cham, 2020, 549–565. ISBN: 978-3-030-40274-7. DOI: [10.1007/978-3-030-40274-7_53](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40274-7_53).
- [AT24] Mesut Alptekin und Katrin Temmen. **Effectiveness Study of an Augmented Reality App as Preparation Tool for Electrical Engineering Laboratory Courses**. In: *Smart Technologies for a Sustainable Future: Proceedings of the 21st International Conference on Smart Technologies & Education. Volume 1*. Hrsg. von Michael E. Auer, Reinhard Langmann, Dominik May und Kim Roos. Bd. 1. 1. Springer Nature, 2024, 297. ISBN: 978-3-031-61891-8. DOI: [10.1007/978-3-031-61891-8_29](https://doi.org/10.1007/978-3-031-61891-8_29).

Anhang

I Anhang zu Abschnitt 1

I.1 Interviewleitfaden für die Besprechung mit Laboringenieuren und wissenschaftlichen Mitarbeitenden

Status Quo & Fragen

Montag, 29. Februar 2016 12:18

Allgemeine Fragen:

- ?
- Welche Kompetenzen werden momentan aufgebaut?
- ?
- Welche müssen aufgebaut werden?
- ?
- Wie kann man diese neu strukturieren?

Konkrete Fragen:

- ?
- Herangehensweise an Thema?
 - ?
 - Vorstellung der Bauteile vs. "Machen lassen"
- ?
- Anzahl der Grp. und Aufteilung
- ?
- Antestat/Kolloquium + Bereitstellung von Informationen
 - ?
 - Umfang & Form
- ?
- Unterlagen?
- ?
- Didaktische Methode -> Überblick?

Ziel:

! Gemeinsames Gespräch mit allen Mitarbeitern aller Laborpraktika

I.2 Protokoll vom 15.06.2015 mit allen beteiligten Laboringenieuren, wissenschaftlichen Mitarbeitenden, Professor:innen und Studierenden der Fachschaft Elektrotechnik

Wünsche & Probleme 2015-06-15

Donnerstag, 4. Februar 2016 14:43

Probleme:

- zeitlich Schwierigkeiten (nicht mit Vorlesungsstoff synchronisiert)
 - roter Faden
 - einführende Veranstaltung
 - einheitliche Nacharbeitung
- • Fehlende Vorkenntnisse/ Voraussetzung der Wings für Lab.-Prakt.
 1. Bauelemente
 2. Technische Informatik
 3. ...

Wünsche (bereits Januar 2015 geäußert)

1. Das Praktikum sollte innerhalb jedes Semesters wie ein Projekt aufgebaut sein, so dass die einzelnen Praktika aufeinander aufbauen. Als Beispiel wurde hierfür das Laborpraktikum vom Fachgebiet Datentechnik angeführt.
2. Außerdem sollte am Anfang des Laborpraktikums, ähnlich wie bei den Computer Engineering Studenten, eine Einführung stattfinden. Diese dient dazu den Studenten die Grundlagen in der Verwendung von Messgeräten näher zu bringen. (Es gibt von Mitarbeitern im Laborpraktikum C Beschwerden über fehlende Ahnung in diesem Bereich)
3. Anpassung des Praktikums an den Lehrplan und die Vorlesungen
4. Vereinheitlichung der Anforderungen an die Ausarbeitung

Stichpunkte zur Sitzung am 15.6.2015 mit Studierenden, Laboringenieuren und Professoren

Frage an Wetzlar: wie umfangreich ist Einführung in Messtechnik? Geht nicht nur von einem Fachgebiet. (CE: 7LP für Praktikum)

Abstimmung auf Vorlesung (Brennstoffzelle – gar nicht in Vorlesung)

MatLab!!! Kombinieren mit Messgeräte-Einführung Dann mehr Leistungspunkte!!

Mikrocontroller-Praktikum von CE als Vorbild für ET

Gemeinsam großes Projekt – Praktikum dort integriert.

Krumme: rote Fäden werden bereit aufgegriffen (Spannungsteiler...), gerade da sind Probleme der Studierenden

Industrielle Messtechnik (austeilen von Steckbrettern – praktische Übung; kommt bei den Studis sehr gut an)

Hellebrand: Praktikum soll interdisziplinär angelegt sein.

Anleitung zur Ausarbeitung (gehört in Vorbereitungskurs)

Warum welcher Versuch? (Diode fehlt den Studis; Bipolartransistoren, MOSFETs ausführlich)

Nachholer in Extragruppe

Praktikumswunsch zu Signal- und Systemtheorie

Wunsch an Fachdidaktik: Leitfaden, wie man Versuche aufbaut – Evaluation wird gewünscht!

Evtl. Wahl aus verschiedenen Versuchen (für Datentechnik Möglichkeit kompletten Prozessor aufzubauen)

I.3 Workshop-Ergebnisse: Ziele der einzelnen Praktika und jeweiligen Versuche

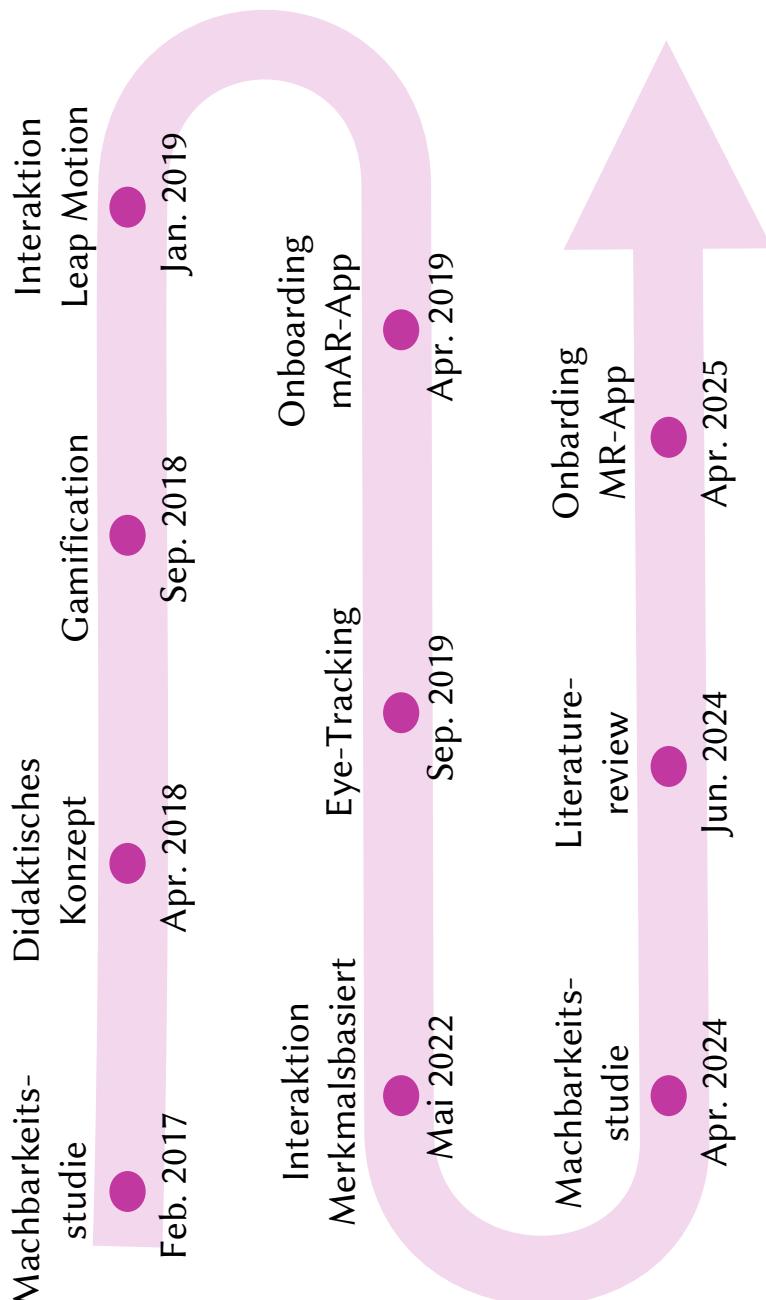
Kompetenzseitige Vorausgesetzte Kompetenzen		Grundlagenpraktikum		A.1 Induktionsvorgänge		A.2 Elektromagnetische Felder	
<ul style="list-style-type: none"> Mittendenken Verständnis der Theorien entwickeln Verantwortungsbewusstsein Sicherheit Zuverlässigkeit (Anmeldung etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> Sorgfalt Punklichkeit Motivation Unterlagen mitbringen 	<ul style="list-style-type: none"> Umgang mit Messfehlern + Messunsicherheit Teamarbeit Gemeinsame Gestaltung von Ausarbeitungen Deutsch/ Englisch Grundkenntnisse 	<ul style="list-style-type: none"> Ausprobieren Lösen Plattform zur Vorbereitung SimulationOszilloskop 	<ul style="list-style-type: none"> Theorie: Zerlegen von größeren Aufgaben Wissen über das Fach (Vorlesung + Literatur) Ohm'sche Gesetze kennen, (wieder) erkennen und anwenden Reflexion und Vertiefung von Fachinhalten 	<ul style="list-style-type: none"> Einfache mathematische Fkt visualisieren und vice versa • Serie vs. Parallel Schaltung Motivation 	<ul style="list-style-type: none"> Motivation Praktische Umsetzung von Schaltplänen => Schaltung Praktikumsbericht verfassen 	<ul style="list-style-type: none"> Umgang mit Messfehlern + Messunsicherheit Praktika 5 goldene Regeln der ET
<ul style="list-style-type: none"> Wenig Freiheitsgrade Ergebnisse + Schlussfolgerungen begründen und (ndl. + schriftl.) Über Ergebnisse diskutieren (Kriterien anlegen) 	<ul style="list-style-type: none"> Berichte schreiben -> Struktur anlegen Formeln setzen und formateren -> LaTeX Fachbegriffe kennen + nutzen 	<ul style="list-style-type: none"> Dokumentation zu Versuch anfertigen Wissenschaftliche Sprache -> Stil: kurz, prägnant, keine Erzählungen 	<ul style="list-style-type: none"> • 	<ul style="list-style-type: none"> • 	<ul style="list-style-type: none"> • 	<ul style="list-style-type: none"> • 	<ul style="list-style-type: none"> •
<ul style="list-style-type: none"> Lineare Netze 	<ul style="list-style-type: none"> Schaltplan umsetzen Schaltplan zeichnen + beschriften Netzteil einsetzen können Messstabsicherheit kennen Diagramme zeichnen -> Achsenbeschriftung Ersatzschaltung an Radalexperiment abgleichen + Abweichungen begründen Messgeräte verwenden ohne DC-Schaltung zu verändern/ stören Angeleitetes Zerlegen und Strukturieren in Einzelschritte (z.B. Überlagerungsverfahren) 	<ul style="list-style-type: none"> Oszilloskop nutzen können • V-t • Signalgenerator einsetzen können • Messveraufnahme planen (z.B. Reihenfolge) • Werte abschauen (z.B. Pendelduauer) • Wie sieht das Ergebnis aus? (Erwartung Planung?) 	<ul style="list-style-type: none"> Oszilloskop x-y (Achsenbeschriftung) • Planen des Versuchsaufbaus (stark eingeschränkt) • Fehlerquellen erkennen + integrieren (z.B. Reproduzierbarkeit) • Kenngrößen angeben + interpretieren • Messgeräte verwenden ohne AC-Schaltung zu stören 	<ul style="list-style-type: none"> • 	<ul style="list-style-type: none"> • Schaltungen (einfache) • Dimensionieren? Kompl. Schaltung (R, L, C) • Dimensionieren? 	<ul style="list-style-type: none"> • 	<ul style="list-style-type: none"> Gleichstrommaschine

Kompetenzen Vorausgesetzte	<ul style="list-style-type: none"> • Einige Freiheitsgrade • Effekte erkennen und erklären (Black-Box-Exp.) 			
	B.1 pn-Übergänge	B.2 PV	Brennstoffzelle	Bipolar Transistor
	<ul style="list-style-type: none"> • Einschränkungen + Grenzen diskutieren • Berichte schreiben + weiterentwickeln • Fachbegriffe kennen + nutzen • Über Ergebnisse diskutieren (theoriegeleitet) • Regressionsschreitung beherrschen 	<ul style="list-style-type: none"> • Kenngrößen angeben + interpretieren • Planung • Erwartungshaltung • Selbständiges zerlegen einer kleinen Aufgabe • Black-Box-Exp. • Bauteile + Geräte auswählen • Regressionsschreitung beherrschen 	<ul style="list-style-type: none"> • MOSFET Transistor 	B.3 Operationsverstärker (OPV)
Kompetenzen Vorausgesetzte	<ul style="list-style-type: none"> • Viele Freiheitsgrade • Ansätze / Lösungen entwickeln • Aufgabenverteilung in der Gruppe 			
	<ul style="list-style-type: none"> • Umfangreiche Experimente/ Aufgaben • Über Ergebnisse diskutieren (theoriegeleitet) • Berichte schreiben „optimieren“ 	<ul style="list-style-type: none"> • Fachbegriffe kennen + nutzen 	<ul style="list-style-type: none"> • Fachbegriffe kennen + nutzen 	<ul style="list-style-type: none"> • Trägerfreq.
Kompetenzen Vorausgesetzte	C.1 VHDL Basics (Gatter/ Counter)	C.2 DAU -> Signalgenerator (VHDL)	ADU mit Counter (VHDL)	FFT mit FPGA
	<ul style="list-style-type: none"> • Hardware- Beschriftungssprache HDL kennen • Multiplexer, Gatter, Wahrheitstabelle, ... verstehen • Wave-Form Analyse -> Fehler - Analyse erkennen • Digitale Systeme verstehen • Zahlendarstellungen dec/hex/bin/oct negative Zahlen 	<ul style="list-style-type: none"> • Digitale Systeme verstehen • Zahlendarstellungen dec/hex/bin/oct negative Zahlen 	<ul style="list-style-type: none"> • Komplexe Systeme analog/ digital • Steuerung entwickeln können (Edl. Automat) 	<ul style="list-style-type: none"> • Abstrakte festlegen • Einfache Frequenzsignale auftragen (?) • Aliaseffekte erkennen • Unmöglichte Artefakte erkennen + bewerten • Programmieren können • Kenngrößen angehen + interpretieren • Einschränkungen + Grenzen diskutieren

I.4 Übersicht der Praktika mit den jeweiligen beteiligten Fachbereichen an der Universität Paderborn und den jeweiligen Versuchen. Stand: 2017

Fachbereich	Versuch	Kurzbeschreibung
Laborpraktikum A	GET-Lab	V1 Lineare Netzwerke Messungen am unbelasteten Spannungsteiler, am belasteten Spannungsteiler I, Leistungsmessung und Leistungsanpassung, exp. Überprüfung des Superpositionsprinzips
		V2 Elektrische und magnetische Felder Messung einer Hysteresekurve, Untersuchung der magnetischen Eigenschaften eines Eisenkerns, Bestimmung der Äquipotentiallinien eines Stromdichtefeldes
		V3 Induktionsvorgänge Wirbelstromdämpfung eines Pendels im Magnetfeld (Waltenhofensches Pendel), Veränderung des Pendelschwingverhaltens in Abhängigkeit vom Pendelkörper
	LEA	V1 RLC-Schwingkreise Bestimmung der Resonanzfrequenz und der Resonanzimpedanz eines ungedämpften Reihenschwingkreises, Bestimmung der Resonanzkurve und der Parameter eines gedämpften Parallelschwingkreises, Abklingvorgang eines gedämpften Parallelschwingkreises, Schwingkreise als Filter.
		V2 Tiefsetzsteller Funktionsweise der Schaltung, Steuerkennlinie, Belastungskennlinien
		V3 Gleichstrommaschinen Motorbetrieb der Gleichstromnebenenschlussmaschine: Aufnehmen der Belastungskennlinien $n = f(MM)$; $I_A = f(MM)$ für unterschiedliche Auslegungen; Motorbetrieb der Gleichstromreihenschlussmaschine: Aufnehmen der Belastungskennlinien $n = f(ML)$; $I_A = f(ML)$ für unterschiedliche Auslegungen
Laborpraktikum B	DATE	V1 Gleitkomma-Addierer Entwurf eines 32 Bit Gleitkomma-Addierer (FPU), der in ein System, bestehend aus einem Prozessor (Plasma CPU) und weiterer Peripherie, integriert werden soll. Das Plasmaystem soll dann für ein XILINX FPGA synthetisiert werden.
	Halbleiterbauelemente	V1 Bipolare Transistoren Einstellung und thermische Stabilisierung des Arbeitspunktes mit Basiswiderstand; Einstellung und thermische Stabilisierung des Arbeitspunktes bei einer Schaltung mit Basisspannungsteiler; Ermittlung der Kenngrößen von Emitterschaltungen (dynamisches Verhalten); Richtig Einstellung des Arbeitspunktes und Übersteuerung bei einer Emitterschaltung
		V2 Messverstärker Messung der Kenngrößen von Operationsverstärkern; Beschreibung der Testschaltung, Operationsverstärker ohne Gegenkopplung; Messung der Offsetspannung, der Eingangsruhestrome, der offenen Spannungsverstärkung, des Eingangswiderstandes, des Ausgangswiderstandes, des Verstärkungs-Bandbreite-Produktes, der maximalen Anstiegssteilheit (SWR); Messungen mit Differenzverstärkern; Untersuchung eines Instrumentationsverstärkers: Aufzeichnen der Ausgangskennlinien; Bestimmung der Schwellenspannung aus der Eingangskennlinie; Bestimmung der Kanallänge und des Kontaktwiderstandes (externer Widerstand)
	Werkstoffe der Elektrotechnik	V1 pn-Übergänge Elektronik des pn-Übergangs, Parameterextraktion, numerische Simulation eines pn-Übergangs
Laborpraktikum C	NEK	V1 Brennstoffzelle Einstieg und Überblick in die Brennstoffzelle; Wirkungsweise der Brennstoffzellentypen
		V2 Elektrische Energieversorgung Grundsätzliche Zusammenhänge des elektrischen Energieversorgungsnetzes; Verhalten des Versorgungsnetzes durch Netzmodell; Verhalten von Synchrongeneratoren; Untertragungsleitungen
		V3 Photovoltaik Messung wichtiger Kenngrößen von Photovoltaik-Zellen; Ermittlung und Visualisierung von Einflüssen wie Abschattungen, Teilabschattungen und anderer Faktoren
	emt	V1 Trägerfrequenzmessbrücke Aufbau und Funktionsweise einer Messbrückenschaltung, bestehend aus zwei Spannungsteilern mit komplexen Widerständen, zur Erfassung der Größe „mechanische Dehnung“
		V2 Digitale Messdatenerfassung Ermittlung einer physikalischen Größe durch Umformung und Zuführung einer proportionalen Spannung an einen ADU; Untersuchung zum korrekten Einsatz von ADUs; Abtastung von Signalen mit einem Abtast-Halteglied
		V3 Signalanalyse Anwendung von Werkzeugen zur Datenanalyse auf aufgenommenen Messsignalen sowie auf digital generierte Daten; Analyse von Zeit-, Amplituden-, Frequenz- und Verschiebezeitbereich

I.5 Übersicht der Forschungsarbeiten und Studien, sowohl veröffentlichte, als auch unveröffentlichte



I.6 Tabellen zur qualitativen Literaturoauswertung

Tabelle 1: Qualitative analysis: Technological aspects and application area with the following abbreviations: mAR = mobile AR; sAR = stationary AR; HMD = Head-mounted display; mb = marker-based; ml = marker-less; lb = location-based; CE = Computer Engineering; EE = Electrical Engineering; CH = Chemistry; PHY = Physics; BIO = Biology; OTS = Other Technical Subjects

Study	Year	Device	Tracking	Laboratory	Application
[AMM11]	2010	sAR	mb	CE	virtual buttons overlayed on real device visible in video stream
[Mar+12]	2012	mAR; HMD	mb	EE	assembling parts of an AC/DC generator superimposed over the real machine
[Ben+14]	2014	sAR; mAR; HMD	ml	CE	virtual microscope
[CL15]	2015	mAR	mb	CH	visualizing movement of electrons
[GJW15]	2015	mAR	mb	BIO	supplementary information links
[Akç+16]	2016	mAR	mb	PHY	supplementary information links
[FK17]	2017	mAR	mb	ME	superimposed virtual motor arm controlling the physical motor arm
[HL17]	2017	mAR	mb	CH	build virtual oxygen supplying equipment
[AT18a]	2018	mAR	mb	EE	supplementary information and quizzes
[CY18]	2018	mAR	ml	BIO	inspect virtual models of equipment and specimen with a microscope
[HS18]	2018	mAR	mb	CH	superimposing signs in physical lab with explanations
[Str+18]	2018	HMD	mb	PHY	visualizing heat conduction
[Zhu+18]	2018	HMD	lb	CH	supplementary information regarding safety signs
[AT19]	2019	mAR	ml	EE	virtual oscilloscope and function generator
[APH20]	2019	mAR	ml	CH	supplementary information links regarding functions and safety of equipment
[Rog+19]	2019	mAR	mb	CH	inspection of various virtual flasks
[Han+19]	2019	mAR	mb	OTS	supplementary information regarding lab safety
[Plu19]	2019	mAR	mb	CH	supplementary information links
[Sin+19]	2019	sAR	mb	EE	virtual oscilloscope and function generator
[AT18b]	2020	mAR	ml	EE	virtual oscilloscope and function generator
[Alt+20]	2020	mAR	ml	PHY	virtual sensing equipment displaying resistance and PSU measurements
[CGC20]	2020	mAR	mb	BIO	visualizing the heart

[Müs+20]2020	mAR	mb	ME	visualizing unit shapes of material
[Nad+20]2020	mAR	ml	EE	supplementary information links and quizzes
[The+20]2020	HMD	mb	PHY	augmenting experiments with real time information
[Yaz+20]2020	mAR	mb	EE	virtual electrical circuits components for inspection
[Din+21]2021	mAR	mb	CH	pouring liquids using virtual beakers
[Kap+21]2021	HMD	mb	PHY	virtual sensing equipment
[Lic+21]2021	mAR	mb	OTS	virtual wave generator
[Söd+21]2021	HMD	mb	BIO	supplementary information links and quizzes
[WCP21]2021	HMD	ml	EE	virtual electrical circuits
[Chu22]2022	mAR	mb	EE	virtual electrical motors
[De+22]2022	HMD	ml	CH	visualizing chemical reactions
[Dom+22]2022	mAR	ml	CH	pouring liquids using virtual beakers
[HG23]2022	mAR	ml	ME	supplementary information links
[IST22]2022	mAR	mb	EE	supplementary information links
[Kap+22]2022	mAR; HMD	mb	BIO	supplementary information links and quizzes
[Nou+22]2022	mAR	mb	CH	supplementary information links
[The+22]2022	HMD	mb	PHY	virtual sensing equipment
[Tul+22]2022	mAR; HMD	mb	EE	virtual electrical circuits
[Vil+22]2022	mAR	mb	OTS	virtual interactive experiments
[Cri+23]2023	HMD	ml	CH	supplementary information regarding equipment usage and safety
[Gua+23]2023	mAR	mb	CH	supplementary information links
[HSA23]2023	mAR	mb	PHY	function generator and shaker to experiment with wave forms in a rope
[KTP23]2023	mAR	mb	EE	virtual sensors and motors
[PSD23]2023	mAR	mb	PHY	visualizing physical concepts
[Bin+23]2023	mAR	mb	EE	virtual multimeter
[Che+24]2024	sAR	mb	CH	pouring liquids using virtual flasks
[Ism+24]2024	mAR	ml	EE	visualizing movement of electrons
[SA24]2024	sAR	mb	EE	virtual oscilloscope and function generator

Tabelle 2: Qualitative analysis: Evaluations of the AR application in the respective research paper

Study	Evaluation	Instrument	Positive results	Negative results
[AMM11]	pre-/post-test; no CG	questionnaire	positive effect on skills in questionnaire; AR is very useful for augmenting real equipment; no disadvantages reported over real equipment	
[Mar+12]	pre-/post-test; no CG	questionnaire; interviews	high acceptance in questionnaire; positive effect on attitude	
[Ben+14]	no evaluation			
[CL15]	pre-/post-test, with CG	questionnaire; knowledge test	positive effect on attitude in questionnaire	AR alone does not necessarily solve anything when app is overwhelming
[GJW15]	pre-/post-test, no CG	questionnaire		neutral responses on acceptance in questionnaire
[Akç+16]	pre-/post-test; with CG	questionnaire; interviews; knowledge test	positive effect on skills in test; positive effect on attitude in questionnaire; high acceptance; students think AR helped	students reported that they skipped studying the regular material
[FK17]	pre-/post-test, with CG	questionnaire; knowledge test	positive effect on skills in test; high acceptance; students liked the app	
[HL17]	pre-/post-test; no CG	questionnaire; knowledge test	positive effect on skills in test; high acceptance	
[AT18a]	no evaluation			
[CY18]	no evaluation		positive effect on attitude in questionnaire; high acceptance; students think it helps with understanding experiments	
[HS18]	no evaluation			
[Str+18]	pre-/post-test; with CG	questionnaire; knowledge test	positive effect on skills in test	
[Zhu+18]	pre-/post-test; with CG	questionnaire	students liked the app more than the traditional approach	no effect on skills in questionnaire

[AT19]	pre-/post-test; no CG	questionnaire	suited for familiarizing with equipment	users did not see the need for AR because they did not fully comprehend the technology yet
[APH20]	pre-/post-test; no CG	questionnaire	high acceptance; students liked the app; suited for familiarizing with equipment; positive effect on efficiency	
[Rog+19]	pre-/post-test; with CG	questionnaire	high acceptance; students liked the app	no difference to regular learning
[Han+19]	no evaluation			
[Plu19]	no evaluation			
[Sin+19]	pre-/post-test; with CG	questionnaire; knowledge test	positive effect on skills in test; positive effect on cognitive load in test; high acceptance; liked the sandbox effect of virtual experiments	
[AT18b]	no evaluation			
[Alt+20]	pre-/post-test; no CG	questionnaire	low cognitive load; slightly positive effect on skills	almost no difference to equivalent non-AR app
[CGC20]	no evaluation			
[Müs+20]	pre-/post-test; no CG	questionnaire		
[Nad+20]	pre-/post-test; no CG	questionnaire	positive effect on attitude in questionnaire; students liked the app	
[The+20]	pre-/post-test; with CG	questionnaire; knowledge test	positive effect on cognitive load	no effect on skills in test
[Yaz+20]	no evaluation			
[Din+21]	no evaluation			
[Kap+21]	pre-/post-test; with CG	questionnaire		no evidence for AR advantages
[Lic+21]	pre-/post-test; no CG	questionnaire; interviews	students liked the app	
[Söd+21]	pre-/post-test; with CG	questionnaire; knowledge test	positive effect on self efficacy; students liked the sandbox effect of virtual experiments	no effects on performance in test

[WCP21]	pre-/post-test; CG	no	questionnaire; knowledge test	positive effect on skills in test	
[Chu22]	pre-/post-test; CG	no	questionnaire	slightly positive effect on attitude in questionnaire	users did not see advantage over virtual equipment without AR; mobile AR might be unappropriate for interactive applications due to small screen
[De +22]	pre-/post-test; with CG		questionnaire	slightly positive effect on attitude in questionnaire	no difference in skills
[Dom+22]	pre-/post-test; CG	no	questionnaire; interviews; knowledge test	suited for familiarizing with equipment	no effects on skills in test; students were overwhelmed by the complexity of the app
[HG23]	pre-/post-test; CG	no	questionnaire; interviews	positive effect on skills in questionnaire; students liked the app	
[IST22]	pre-/post-test; CG	no	questionnaire; interviews		
[Kap+22]	pre-/post-test; CG	no	questionnaire	high acceptance	
[Nou+22]	pre-/post-test; CG	no	questionnaire	positive effect on attitude in questionnaire; students liked the app	
[The+22]	pre-/post-test; with CG		questionnaire		no advantage over regular display when it comes to skills; higher cognitive load
[Tul+22]	pre-/post-test; with CG		questionnaire; knowledge test	positive effect on skills in test; positive effect on attitude in questionnaire; high acceptance; students liked the app	
[Vil+22]	pre-/post-test; CG	no	questionnaire; interviews	especially effective for low achieving students	
[Cri+23]	pre-/post-test; CG	no	questionnaire	students liked the app	bad at delivering conceptual knowledge that does not require physical interaction because it adds complexity
[Gua+23]	pre-/post-test; CG	no	questionnaire	positive effect on attitude in questionnaire	

[HSA23]	pre-/post-test; with CG	questionnaire	students liked the app
[KTP23]	no evaluation		
[PSD23]	pre-/post-test; no CG	questionnaire; knowledge test	positive effect on skills in test
[Bin+23]	post-test; no CG	questionnaire	positive effect on skills in questionnaire; students liked to use the app
[Che+24]	pre-/post-test; no CG	questionnaire; interviews; knowledge test	positive effect on skills in test; students liked the app; students liked the sandbox effect of virtual experiments
[Ism+24]	no evaluation		
[SA24]	pre-/post-test; with CG	questionnaire; knowledge test	positive effect on skills in test; positive effect on attitude in questionnaire students expressed need for intuitive user experience

II Anhang zu Abschnitt 2

II.1 Codeauszüge zur Realisierung des Oszilloskops und Funktionsgenerators in Python

Abstraktionsstufe 2: Klasse Funktionsgenerator und Oszilloskop

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from ipywidgets import interact, FloatSlider, Dropdown, Output
4 from IPython.display import display
5
6 class FunctionGenerator:
7     def __init__(self, callback=None):
8         self.signal_type = 'Sinus'
9         self.frequency = 1.0 # in Hz
10        self.freq_scale = 'Hz'
11        self.amplitude = 1.0 # in V
12        self.amp_scale = 'V'
13        self.callback = callback # Rückruffunktion, um das
14        → Oszilloskop zu aktualisieren
15
16    def generate_signal(self, t):
17        freq = self.frequency if self.freq_scale == 'Hz' else 1
18        → / self.frequency
19        amp = self.amplitude if self.amp_scale == 'V' else
20        → self.amplitude / 1000
21
22        if self.signal_type == 'Sinus':
23            return amp * np.sin(2 * np.pi * freq * t)
24        elif self.signal_type == 'Rechteck':
25            return amp * np.sign(np.sin(2 * np.pi * freq * t))
26        elif self.signal_type == 'Dreieck':
27            return amp * 2 * np.arcsin(np.sin(2 * np.pi * freq *
28            → t)) / np.pi
29        elif self.signal_type == 'Sägezahn':
30            return amp * 2 * (t * freq - np.floor(0.5 + t *
31            → freq))
32
33    def setup_ui(self):
34        interact(self.update_signal_type,
```

```

30         signal_type=Dropdown(options=[ 'Sinus',
31             'Rechteck', 'Dreieck', 'Sägezahn'],
32             description='Signal-Typ'))
33
34     interact(self.update_frequency,
35             frequency=FloatSlider(min=0.1, max=10.0,
36             step=0.1, value=1.0,
37             description='Frequenz'),
38             freq_scale=Dropdown(options=[ 'Hz', 'ms'],
39             description='Frequenz-Skala'))
40
41     interact(self.update_amplitude,
42             amplitude=FloatSlider(min=0.1, max=5.0,
43             step=0.1, value=1.0,
44             description='Amplitude'),
45             amp_scale=Dropdown(options=[ 'V', 'mV'],
46             description='Amplituden-Skala'))
47
48
49     def update_signal_type(self, signal_type):
50         self.signal_type = signal_type
51         if self.callback:
52             self.callback()
53
54     def update_frequency(self, frequency, freq_scale):
55         self.frequency = frequency
56         self.freq_scale = freq_scale
57         if self.callback:
58             self.callback()
59
60     def update_amplitude(self, amplitude, amp_scale):
61         self.amplitude = amplitude
62         self.amp_scale = amp_scale
63         if self.callback:
64             self.callback()
65
66
67     class Oscilloscope:
68         def __init__(self, func_gen):
69             self.func_gen = func_gen
70             self.func_gen.callback = self.display_signal # Setzen
71             des Rückrufs im FunctionGenerator
72             self.time_base = 1.0 # s/Div

```

```

62     self.time_scale = 's'  # Standard Skala für Zeit
63     self.sensitivity = 1.0  # V/Div
64     self.sens_scale = 'V'  # Standard Skala für
65     ↵ Empfindlichkeit
66     self.output = Output()  # Output-Widget für die Anzeige
67     ↵ des Graphen
68
68 def display_signal(self):
69     t_max = 10 * self.time_base if self.time_scale == 's'
70     ↵ else 10 / self.time_base
71     t = np.linspace(0, t_max, 1000)
72     y = self.func_gen.generate_signal(t)  # Signal
73     ↵ generieren ohne Skalierung
74
74 # Skalieren des Signals basierend auf der
75     ↵ Empfindlichkeitseinstellung
76     y_scaled = y / self.sensitivity
77
77 with self.output:
78     self.output.clear_output(wait=True)  # Vorherige
79     ↵ Plots löschen
80     plt.figure(figsize=(10, 6))
81     plt.plot(t, y_scaled)
82     plt.grid(True, which='both', linestyle='--',
83     ↵ linewidth=0.5)
84     plt.title(f'{self.func_gen.signal_type}-Signal')
85     plt.xlabel(f'Zeit ({self.time_scale})')
86     plt.ylabel(f'Amplitude ({self.sens_scale})')
87
87 # Y-Achse festlegen
88     plt.ylim(-5, 5)
89
89 # Legende hinzufügen, die die aktuellen
90     ↵ Einstellungen anzeigt
91     plt.legend([f'Zeitbasis: {self.time_base}'
92     ↵ {self.time_scale}, Empfindlichkeit:
93     ↵ {self.sensitivity} {self.sens_scale}'],
94     ↵ loc='upper right')
95     plt.show()
96
96 def setup_ui(self):

```

```

92     interact(self.update_time_base,
93             time_base=FloatSlider(min=0.1, max=2.0,
94             ↵ step=0.1, value=self.time_base,
95             ↵ description='Zeitbasis'),
96             time_scale=Dropdown(options=['s', 'ms'],
97             ↵ description='Zeit-Skala'))
98
99
100    interact(self.update_sensitivity,
101             sensitivity=FloatSlider(min=0.1, max=5.0,
102             ↵ step=0.1, value=self.sensitivity,
103             ↵ description='Empfindlichkeit'),
104             sens_scale=Dropdown(options=['V', 'mV'],
105             ↵ description='Empf.-Skala'))
106
107
108    display(self.output) # Das Output-Widget anzeigen
109
110
111
112    def update_time_base(self, time_base, time_scale):
113        self.time_base = time_base
114        self.time_scale = time_scale
115        self.display_signal() # Signal aktualisieren
116
117
118    def update_sensitivity(self, sensitivity, sens_scale):
119        self.sensitivity = sensitivity
120        self.sens_scale = sens_scale
121        self.display_signal() # Signal aktualisieren
122
123
124    func_gen = FunctionGenerator()
125    oscilloscope = Oscilloscope(func_gen)
126
127
128    # UI für den FunctionGenerator einrichten
129    func_gen.setup_ui()
130
131
132    # UI für das Oszilloskop einrichten und Signal anzeigen
133    oscilloscope.setup_ui()

```

Abstraktionsstufe 3

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt

```

```

3  from ipywidgets import interact, FloatSlider, Dropdown
4  from IPython.display import display as ipydisplay
5
6  class FunctionGenerator:
7      def __init__(self):
8          self.signal_type = 'Sinus' # Default-Wert
9          self.frequency = 1.0 # in Hz
10         self.amplitude = 1.0 # in V
11
12     def generate_signal(self, t):
13         if self.signal_type == 'Sinus':
14             return self.amplitude * np.sin(2 * np.pi *
15                 ↳ self.frequency * t)
16         elif self.signal_type == 'Rechteck':
17             return self.amplitude * np.sign(np.sin(2 * np.pi *
18                 ↳ self.frequency * t))
19         elif self.signal_type == 'Dreieck':
20             return self.amplitude * 2 * np.arcsin(np.sin(2 *
21                 ↳ np.pi * self.frequency * t)) / np.pi
22         elif self.signal_type == 'Sägezahn':
23             return self.amplitude * 2 * (t * self.frequency -
24                 ↳ np.floor(0.5 + t * self.frequency))
25
26     class Oscilloscope:
27         def __init__(self):
28             self.sensitivity = 1.0 # V/Div
29             self.time_base = 1.0 # s/Div
30
31
32     class Display:
33         def __init__(self, func_gen, scope):
34             self.func_gen = func_gen
35             self.scope = scope
36
37         def update_display(self, signal_type='Sinus', frequency=1.0,
38             ↳ freq_scale='Hz', amplitude=1.0, amp_scale='V',
39             ↳ sensitivity=1.0, time_base=1.0):
40             self.func_gen.signal_type = signal_type
41             if freq_scale == 'ms':
42                 self.func_gen.frequency = 1 / frequency
43             else:
44                 self.func_gen.frequency = frequency

```



```
71         freq_scale=Dropdown(options=[ 'Hz' , 'ms' ]),  
72         amplitude=FloatSlider(min=0.1, max=5.0,  
73             step=0.1, value=1.0),  
74         amp_scale=Dropdown(options=[ 'V' , 'mV' ]),  
75         sensitivity=FloatSlider(min=0.1, max=5.0,  
76             step=0.1, value=1.0),  
77         time_base=FloatSlider(min=0.1, max=2.0,  
78             step=0.1, value=1.0))  
79  
80 app = MainApp()  
81 app.run()
```

II.2 Überblick über die entwickelten Prototypen: Darstellungs- bzw. Nutzungsform, genutzte SDKs, und Schwerpunkt

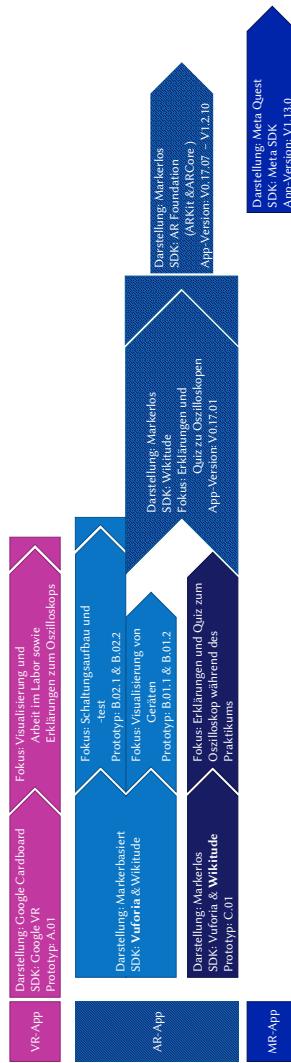


Abbildung 1: Überblick über die entwickelten Prototypen: Darstellungs- bzw. Nutzungsform, genutzte SDKs, und Schwerpunkt

II.3 Konkretisierte Lernziele

Hier sind die konkretisierten Lernziele für das Vorpraktikum formuliert, wie sie sowohl in der AR-Anwendung, als auch im E-Labor der Fachschaft Elektrotechnik angestrebt werden. Die Liste ist bewusst ausführlich gehalten, wird aber im Rahmen des Vorpraktikums bis zur dritten Stufe genutzt, da die späteren Ziele im eigentlichen Laborpraktikum abgedeckt werden. Studierende können

- **Lernziel 1a**

- die wichtigsten elektronischen Bauteile wie Widerstand, Kondensator, Spule und Dioden anhand ihrer Symbole und in den jeweiligen, virtuellen Bauformen korrekt *wiedererkennen*.
- die Bedeutung und Verwendung der Markierungen auf den Bauteilen *beschreiben*.
- die grundlegenden physikalischen Eigenschaften von Kondensatoren, Spulen, Widerständen und Dioden *wiedergeben*.
- die Funktionen und Anwendungsbereiche der verschiedenen elektronischen Bauteile *angeben*.

- **Lernziel 1b**

- die gängigen Laborgeräte wie Oszilloskop, Funktionsgenerator, Netzteil und Vielfachmessgerät sowohl als Symbole, als auch in virtueller Darstellung *wiedererkennen*.
- die Hauptanwendungsfelder von Oszilloskopen, Funktionsgeneratoren, Vielfachmessgeräten und Netzteilen *beschreiben*.
- die verschiedenen Bedienelemente und Anschlüsse an den Laborgeräten *lokalisieren* und die Bedeutung und Verwendung dieser *wiedergeben*.

- **Lernziel 2a**

- die Unterschiede zwischen idealen und realen elektrotechnischen Komponenten *erläutern*.
- die Auswirkungen von Toleranzen, parasitären Effekten und temperaturabhängigen Eigenschaften auf das Schaltungsverhalten *beschreiben*.

- typische Abweichungen wie Widerstandsänderungen vom Nennwert, Frequenzabhängigkeiten bei Spulen und Kondensatoren *erklären*.
- den Einfluss der realen Eigenschaften auf Messungen und Schaltungen *verstehen* und die Unterschiede zu idealen Modellen *beschreiben*.
- die Wirkungsweise von Kondensatoren, Spulen, Widerständen und Dioden in einfachen Schaltungen *erklären*.

- **Lernziel 2b**

- die Bedienelemente von Laborgeräten *erläutern* und die grundlegenden Konzepte wie Amplitude, Frequenz und Phasenverschiebung am Oszilloskop *bestimmen*.
- die Beziehung zwischen den Einstellungen eines Funktionsgenerators und der erzeugten Wellenformen *verstehen*.
- die Mehrfachfunktionen von Bedienelementen an Laborgeräten, wie z. B. Drehregler mit zusätzlicher Bestätigungsfunction, *verstehen* und deren Anwendung *beschreiben*.

- **Lernziele 3a**

- Widerstandsnetzwerke *aufbauen*, die bestimmte Funktionen erfüllen, z. B. Spannungsteiler
- Schaltungen aus Widerständen, Spulen und Kondensatoren *aufbauen*, um bestimmte Funktionen zu erfüllen, z. B. Hoch-/Tiefpass-Filter
- vorgegebene Schaltungen durch Ändern der elektronischen Bauteile *modifizieren*, um andere Schaltungseigenschaften zu realisieren.
- Eigenschaften von elektronischen Bauteilen durch geeignete Schaltungen *visualisieren*, z. B. Auf-/Entladevorgang beim Kondensator oder Erzeugung von magnetischen Feldern.

- **Lernziele 3b**

- die verschiedenen Bedienelemente von Laborgeräten korrekt *einstellen* und zielgerichtet *verwenden*.
- ein Oszilloskop *bedienen*, um die wichtigsten Signalparameter zu *bestimmen*.

- die grundlegenden Schritte *durchführen* und ein Vielfachmessgerät so *einstellen*, um korrekt Spannung und Stromstärke in einer Schaltung zu *messen*.
- ein Vielfachmessgerät *bedienen*, um wichtige Parameter elektronischer Bauteile wie Widerstand, Kapazität und Induktivität zu *bestimmen*.
- die grundlegenden Schritte *planen*, um Messungen von Spannung und Strom mit einem Multimeter *durchzuführen*.
- die geeigneten Einstellungen eines Funktionsgenerators *ermitteln*, um bestimmte Signaltypen zu *erzeugen*.

- **Lernziel 4a**

- komplexe Schaltungen *analysieren* und die Funktion jedes Bauteils innerhalb der Schaltung *begründen*.
- die Auswirkungen von Parameteränderungen der Bauteile auf die Gesamtschaltung *darlegen*.
- die Eignung von Bauteilen für spezifische Anwendungen *einschätzen* und *begründen*, warum bestimmte Komponenten in bestimmten Schaltungen bevorzugt werden.
- die Leistungsfähigkeit einer Schaltung *analysieren*, *bewerten* und mögliche Verbesserungen *vorschlagen*.

- **Lernziel 4b**

- die Vor- und Nachteile verschiedener Laborgeräte *gegenüberstellen* und *argumentieren*, warum ein bestimmtes Gerät für eine gegebene Aufgabe besser geeignet ist als ein anderes.
- die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Messungen zwischen und innerhalb der verschiedenen Laborgeräte *unterscheiden* und die Auswirkungen von Messfehlern auf die Ergebnisse *reflektieren*.
- Probleme in einer Schaltung *ermitteln*, indem sie die Ausgangsspannungssignal mittels eines Vielfachmessgerätes/Oszilloskops *prüfen*.
- Signale auf dem Bildschirm eines Oszilloskops *untersuchen* und *interpretieren*.

- **Lernziel 5a und b**

- elektronische Schaltungen unter Verwendung und Integration mehrerer Bauteile *entwerfen*.
- spezifische Schaltungen *entwickeln*, um konkrete Fragestellungen zu beantworten.
- neue Anwendungen für elektronische Bauteile *identifizieren* und deren Einsatzmöglichkeiten *erweitern*.
- eigenständig Experimente *entwerfen*, *planen* und *durchführen*.

II.4 Fragebogen zur Onboarding-Studie

Sehr geehrte/r Proband/in.

Im Rahmen einer Studie zur Beurteilung der Qualität und des User Experience bitte ich Sie einige Fragen zur vorgestellten Augmented Reality (AR) App zu beantworten.

Bitte füllen Sie den Bogen vollständig und so genau wie möglich aus.

Es werden keine, auf Ihre Person zurückführbaren Daten erfragt, sämtliche Informationen vertraulich behandelt und nicht an Dritte weitergegeben.

1. Allgemeines zur Person			
Geschlecht	<input type="radio"/> männlich	<input type="radio"/> weiblich	
Studiengang			
Seit wann besitzen Sie ein Smartphone/ Tablet (in Jahren)?			
Welche(s) Betriebssystem(e) nutzen Sie? (Mehrfachauswahl möglich.)	<input type="checkbox"/> Android	<input type="checkbox"/> Symbian	
	<input type="checkbox"/> iOS	<input type="checkbox"/> BlackBerry	
	<input type="checkbox"/> Windows Mobile	<input type="checkbox"/> Andere	
Haben Sie bereits eine Augmented Reality App genutzt?	<input type="radio"/> Ja	<input type="radio"/> Nein	
Wie oft nutzen Sie Ihr Smartphone/ Tablet am Tag?	sehr selten	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> sehr häufig	
Wofür nutzen Sie das Smartphone/ Tablet? (Mehrfachauswahl möglich.)	<input type="checkbox"/> Unterhaltung	<input type="checkbox"/> Kommunikation	
	<input type="checkbox"/> Spiele	<input type="checkbox"/> Social Media	
	<input type="checkbox"/> Produktivität	<input type="checkbox"/> Organisation	

Bitte kreuzen Sie im Folgenden an, inwieweit die Aussagen zutreffen.

2. Onboarding					
	Trifft gar nicht zu				Trifft voll zu
Die Instruktionen der App fand ich hilfreich	<input type="radio"/>				
Ich hatte schnell einen Überblick über die verschiedenen Funktionen der App.	<input type="radio"/>				
Die Funktionen der App sind selbsterklärend.	<input type="radio"/>				
Die App reagiert schnell auf Eingaben.	<input type="radio"/>				
Die App läuft stabil und zuverlässig, ohne Abstürze oder Eingabeverzögerungen.	<input type="radio"/>				

Anregungen/ Kritik / Verbesserungswünsche:	
---	--

Die folgenden Fragen bestehen aus Gegensatzpaaren von Eigenschaften, die das Produkt haben

kann. 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 zum Produkt passt.

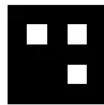
Es gibt keine „richtige“ oder „falsche“ Antwort. Ihre persönliche Meinung zählt!

3. User Experience (UX)								
	1	2	3	4	5	6	7	
unerfreulich	<input type="radio"/>	erfreulich 1						
unverständlich	<input type="radio"/>	verständlich 2						
kreativ	<input type="radio"/>	phantasielos 3						
leicht zu lernen	<input type="radio"/>	schwer zu lernen 4						
wertvoll	<input type="radio"/>	minderwertig 5						
langweilig	<input type="radio"/>	spannend 6						
uninteressant	<input type="radio"/>	interessant 7						
unberechenbar	<input type="radio"/>	voraussagbar 8						
schnell	<input type="radio"/>	langsam 9						
originell	<input type="radio"/>	konventionell 10						
behindernd	<input type="radio"/>	unterstützend 11						
gut	<input type="radio"/>	schlecht 12						
kompliziert	<input type="radio"/>	einfach 13						
abstoßend	<input type="radio"/>	anziehend 14						
herkömmlich	<input type="radio"/>	neuartig 15						
unangenehm	<input type="radio"/>	angenehm 16						
sicher	<input type="radio"/>	unsicher 17						
aktivierend	<input type="radio"/>	einschläfernd 18						
erwartungskonform	<input type="radio"/>	nicht erwartungskonform 19						
ineffizient	<input type="radio"/>	effizient 20						
übersichtlich	<input type="radio"/>	verwirrend 21						
unpragmatisch	<input type="radio"/>	pragmatisch 22						
aufgeräumt	<input type="radio"/>	überladen 23						
attraktiv	<input type="radio"/>	unattraktiv 24						
sympathisch	<input type="radio"/>	unsympathisch 25						
konservativ	<input type="radio"/>	innovativ 26						

Vielen Dank für die Teilnahme an der Umfrage!

II.5 Unterlagen zur Eye-Tracking-Studie

II.6 Aufgabe am realen Oszilloskop



[Hier eingeben]



Aufgabe zum Oszilloskop

Teilnehmer Nr.

**Bestimmen Sie folgende Kennwerte des
empfangenen Signals durch die Nutzung des**

1. Signalform

2. Amplitude

3. Frequenz



II.7 Interview-Fragebogen für Expert:innen



[Hier eingeben]



Interview/ Fragebogen zu „Experten“

Teilnehmer Nr.

1. Geschlecht: männlich
 weiblich

2. Alter: _____

3. Berufliche Vorerfahrung mit Labortätigkeit:

Dauer: _____ Tätigkeiten: _____

Dauer: _____ Tätigkeiten: _____

Dauer: _____ Tätigkeiten: _____

5. Welches Praktikum/ Versuche werden betreut?

6.1 Kommt ein Oszilloskop zum Einsatz? ja
 nein

6.2 In welcher Form?/ Wie intensiv?/ Welche Funktionen?

7.1 Arbeiten Sie privat und/oder beruflich (Uni) mit einem Oszilloskop?

ja nein 7.2 Häufigkeit: _____

8. Wie stark würden Sie ihr Wissen im Umgang mit einem Oszilloskop einschätzen?

sehr niedrig	<input type="radio"/>	sehr hoch					
--------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------

II.8 Interview-Fragebogen für Anfänger:innen



[Hier eingeben]



Interview/ Fragebogen zu „Novizen“

Teilnehmer Nr.

1. Geschlecht: männlich
 weiblich

2. Alter: _____

3. Studiengang: _____

4. Semester: _____

5. Haben Sie bereits eines der Laborpraktika A - C im Laufe Ihres Studiums durchlaufen?

- ja
 nein

6. Haben Sie bereits vorher mit einem Oszilloskop gearbeitet (Privat oder Uni)?

- ja
 nein

7. Wie stark würden Sie ihr Wissen im Umgang mit einem Oszilloskop einschätzen?

sehr niedrig sehr hoch

II.9 Leitfaden zur Durchführung

Vorgehen/ Leitfaden

1. Informationen zur Studie:

- UI von Laborgeräten mittels Eye-Tracking untersuchen
- Aufgabe zu einem Gerät vorgegeben und Lösen dieser in max. 5 Minuten
- Gerne lautes denken (Gedachtes laut aussprechen), wenn es nicht irritierenden ist
- Anonymisierung -> keine Personenbezogenen Daten gespeichert oder weitergegeben

2. Einstellen des Signalgenerators:

- Frequenz auf 2.480 Hz setzen
- Amplitude auf 2.48 Vpp setzen
- darauf achten, welcher Kanal aktiv und Kabel entsprechend anschließen

3. Aufsetzen und Kalibrieren der Eye-Tracking Brille

- **Hinweis:** Keine großen Kopfbewegungen während und nach Kalibrierung
 - o Relativ stabil sitzen (kein hin und her schaukeln...)
- Kamera des Eye-Trackers so heraus-/ hineinschieben das komplette Auge erfasst wird
- Im Eye-Camera-Window
 - o Auf *ROI* klicken und Bereich auf relevante Auge skalieren
 - o Auf *Algorithm* klicken und min und max pupil diameter so einstellen, dass grüner Kreis zwischen min und max (2 rote Kreise) befindet
-
- Pupil Calibration Marker drucken und auf selben abstand wie Oszilloskop halten
- Im Pupil Player Rechte leiste auf *Calibration* klicken und auf Manual Marker einstellen
 - o Confidence auf 0.9 Stellen
- „C“ auf der Tastatur drücken um die Kalibrierung zu beginnen
- Ca. 9 mal verschiedene Positionen für die *Calibrationmarker* nehmen
-
- Plugin Manager:



- Aktiviere *Blinkdetection*
- Aktiviere *Camera intrinsics Estimation*:
 - Im *CiE Menu* auf Radial stellen
 - Aktiviere „*Show undistorted Image*“

4. Zwischen-Check für Offset-Korrektur

- Record oder „R“ drücken
- Proband auffordern Marker am Oszilloskop von oben links nach unten rechts zu betrachten
- Jeweils immer mit Finger hinzeigen
- Record beenden

5. Bearbeitung der Aufgabe ohne Rückfragen

- Record oder „R“ drücken
- Zeit stoppen (max. 5 Min.)
- Diktiergerät starten
- Zeit stoppen – nach max. 5 Min. Record beenden

6. Nach der Studie-> Einstellen des Oszilloskops:

- Amplitudenskalierung max. nach links drehen
- Frequenzskalierung max. nach rechts drehen
- Trigger-level aus sichtbaren Bereich verschieben

III Anhang zu Abschnitt 3

III.1 Moodle Fragen zum Online-Test für die Gesamtevaluation

Frage 1

Nicht beantwortet

Nicht bewertet

[V1 \(neueste\)](#)

Damit der Fragebogen zum Quiz anonym zugeordnet werden kann, wird hier ein anonymer Code generiert, der nicht auf deine Person zurückführbar ist.

Bitte gebe folgendes an:

Ersten beiden Buchstaben des Vornamens Deiner Mutter

Ersten beiden Buchstaben des Vornamens Deines Vaters

Tag des eigenen Geburtsdatums (zweistellig, z.B. 08)

Frage 2

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 1

[V1 \(neueste\)](#)

Was ist ein Oszilloskop?

- Ein Messinstrument
- Eine Signalquelle
- Eine elektronische Last
- Eine Strom-/Spannungsquelle

Frage 3

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 2

[V1 \(neueste\)](#)

Was stellt ein Oszilloskop grafisch dar?

Wählen Sie eine oder mehrere Antworten:

- Widerstand über Zeit
- Strom über Zeit
- Spannung über Zeit

Frage 4

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 3

[V1 \(neueste\)](#)

Was kann man mit einem Oszilloskop **direkt** messen?

Wählen Sie eine oder mehrere Antworten:

- Strom
- Signalverläufe
- Induktivität
- Spannung
- Frequenz
- Widerstand

Frage 5

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 2

[v1 \(neueste\)](#)

In welchen Fällen ist ein Oszilloskop besonders hilfreich?

Wählen Sie eine oder mehrere Antworten:

- Bei Gleichspannung
- Bei Wechselspannung
- Bei ohmschen Verbrauchern
- Bei Schwingkreisen

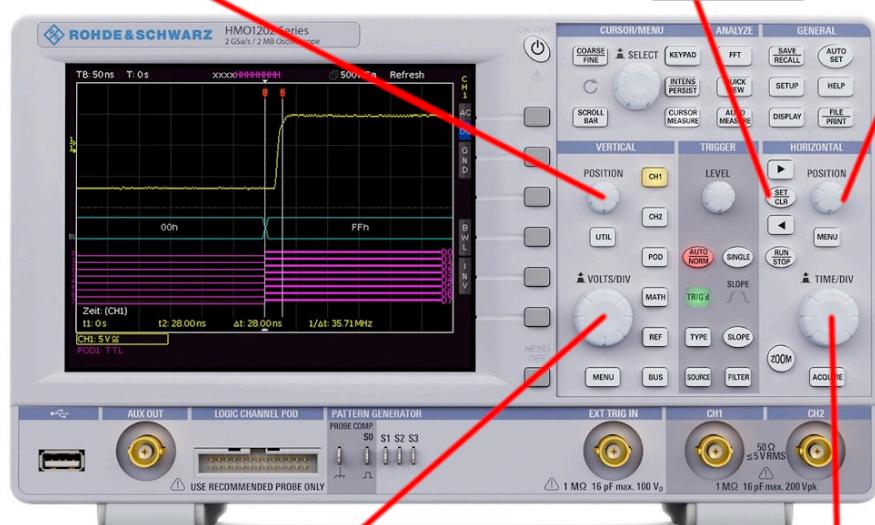
Frage 6

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 4

[v1 \(neueste\)](#)

Ordne den Bedienelementen die passenden Bezeichnungen zu.



Empfindlichkeit

Zeitbasis

Horizontale Verschiebung

Vertikale Verschiebung

Horizontal zentrieren

Vertikal zentrieren

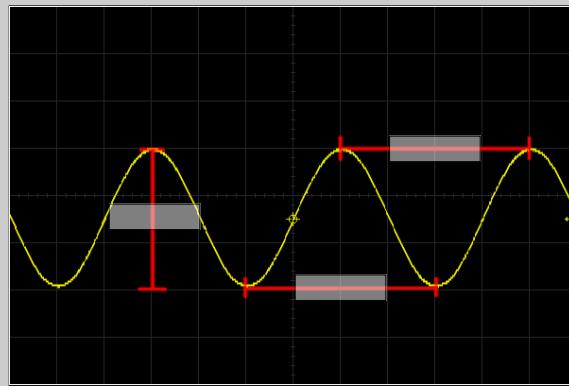
Frage 7

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 3

v1 (neueste)

Ordne den Markierungen am Signal die passenden Begriffe zu.



Frequenz

Amplitude

Offset

Maximum

Minimum

Periodendauer

Mittelwert

Peak-to-Peak

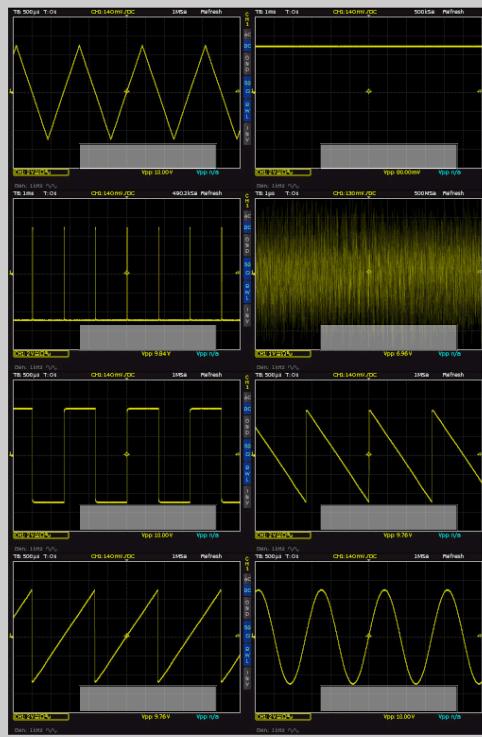
Frage 8

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 3

v1 (neueste)

Ordne den Signalformen die richtigen Namen zu.



Unzutreffend

Stufensignal

Treppensignal

Trapezsignal

Pulssignal

Rechtecksignal

Sinussignal

Tangensignal

Dreiecksignal

Gleichspannungssignal

Sägezahnsignal

Rauschen

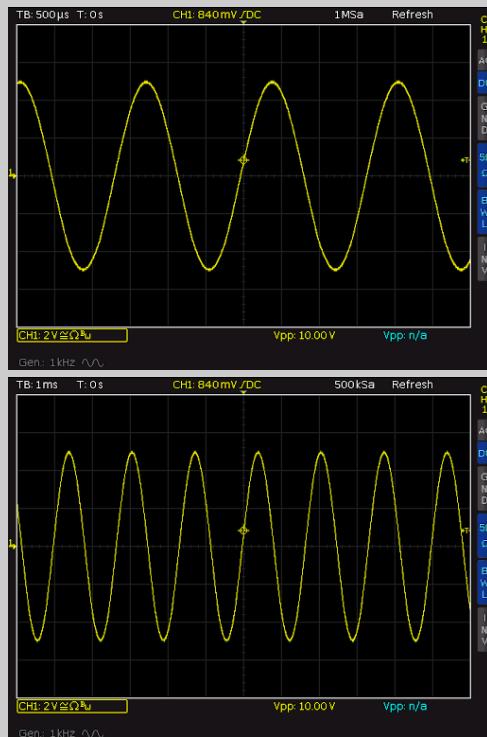
Frage 9

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 3

v1 (neueste)

Was wurde am Oszilloskop verstellt, um bei gleichem Signal vom oberen zum unteren Bild zu kommen?



- Erhöhung der Zeit pro Kästchen (Zeitbasis)
- Verringerung der Zeit pro Kästchen (Zeitbasis)
- Erhöhung der Spannung pro Kästchen (Pegeleinstellung)
- Verringerung der Spannung pro Kästchen (Pegeleinstellung)
- Erhöhung des Triggerlevels pro Kästchen
- Verringerung des Triggerlevels pro Kästchen

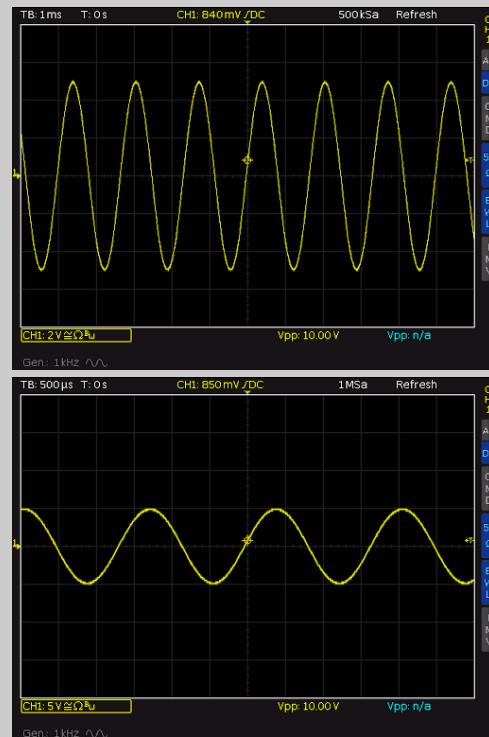
Frage 10

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 3

v1 (neueste)

Was wurde am Oszilloskop verstellt um bei gleichem Signal vom oberen zum unteren Bild zu kommen?



- Erhöhung der Zeit pro Kästchen (Zeitbasis)
- Verringerung der Zeit pro Kästchen (Zeitbasis)
- Erhöhung der Spannung pro Kästchen (Empfindlichkeit)
- Verringerung der Spannung pro Kästchen (Empfindlichkeit)
- Erhöhung des Triggerlevels pro Kästchen
- Verringerung des Triggerlevels pro Kästchen

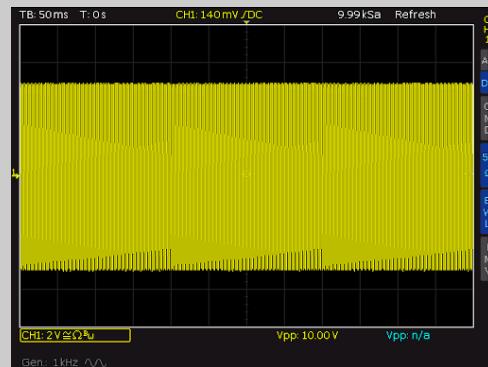
Frage 11

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 2

[v1 \(neueste\)](#)

Warum lässt sich das Signal nicht richtig ablesen?



- Zu wenig Zeit pro Kästchen (Zeitbasis)
- Das Oszilloskop muss neu gestartet werden
- Der Triggerlevel ist unpassend eingestellt
- Das Signal lässt sich (aus technischen Gründen) nicht besser darstellen
- Zu viel Spannung pro Kästchen (Empfindlichkeit)
- Zu wenig Spannung pro Kästchen (Empfindlichkeit)
- Zu viel Zeit pro Kästchen (Zeitbasis)

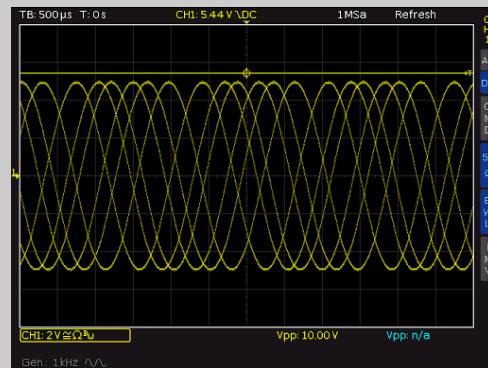
Frage 12

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 2

[v1 \(neueste\)](#)

Warum lässt sich das Signal nicht richtig ablesen?



- Der Triggerlevel ist unpassend eingestellt
- Das Oszilloskop muss neu gestartet werden
- Zu viel Spannung pro Kästchen (Empfindlichkeit)
- Zu viel Zeit pro Kästchen (Zeitbasis)
- Zu wenig Zeit pro Kästchen (Zeitbasis)
- Zu wenig Spannung pro Kästchen (Empfindlichkeit)

Frage 13

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 2

v1 (neueste)

Warum lässt sich das Signal nicht richtig ablesen?



- Zu wenig Spannung pro Kästchen (Empfindlichkeit)
- Zu viel Zeit pro Kästchen (Zeitbasis)
- Der Triggerlevel ist unpassend eingestellt
- Das Signal lässt sich (aus technischen Gründen) nicht besser darstellen
- Zu wenig Zeit pro Kästchen (Zeitbasis)
- Zu viel Spannung pro Kästchen (Empfindlichkeit)

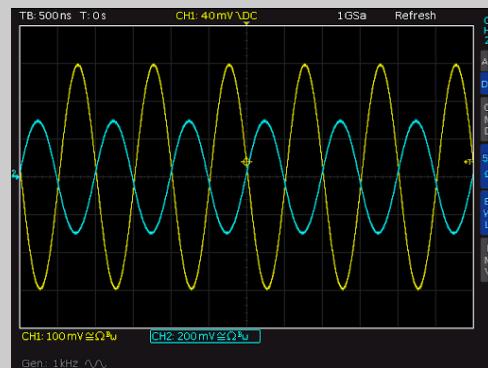
Frage 14

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 3

v1 (neueste)

Welches Signal an welchem Kanal hat die größere Amplitude?



- Das Signal an Kanal 1 hat die größere Amplitude.
- Das Signal an Kanal 2 hat die größere Amplitude.
- Die Signale an beiden Kanälen haben etwa die gleiche Amplitude.
- Die beiden Signale lassen sich nicht vergleichen.

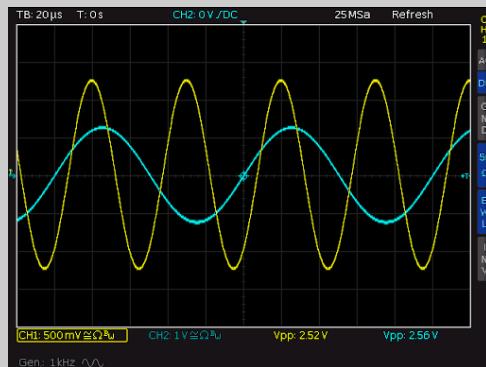
Frage 15

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 3

v1 (neueste)

Welches Signal an welchem Kanal hat die größere Periodendauer?

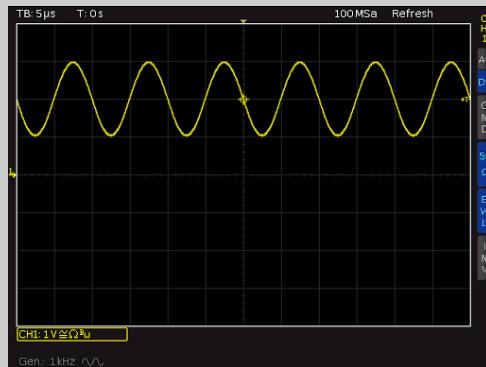


- Das Signal an Kanal 1 hat die größere Periodendauer
- Das Signal an Kanal 2 hat die größere Periodendauer
- Die Signale an beiden Kanälen haben etwa die gleiche Periodendauer
- Die beiden Signale lassen sich nicht vergleichen.

Information

v1 (neueste)

Gegeben sei die folgende Messung:



Frage 16

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 2

v1 (neueste)

Welche Spitze-Spitze-Spannung in Volt hat das anliegende Signal?

Antwort:

Frage 17

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 2

[v1 \(neueste\)](#)

Welchen Mittelwert in Volt hat das anliegende Signal?

Antwort: **Frage 18**

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 2

[v1 \(neueste\)](#)

Welche Offsetspannung in Volt hat das anliegende Signal?

Antwort: **Frage 19**

Nicht beantwortet

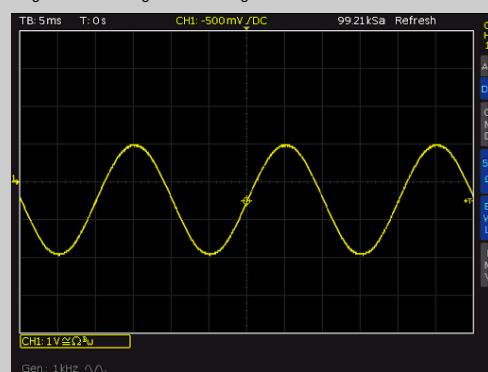
Erreichbare Punkte: 2

[v1 \(neueste\)](#)

Welche maximale Spitze-Spitze-Spannung in Volt kann bei den verwendeten Einstellungen angezeigt werden?

Antwort: **Information**[v1 \(neueste\)](#)

Gegeben sei die folgende Messung:

**Frage 20**

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 2

[v1 \(neueste\)](#)

Welche Periodendauer in Millisekunden hat das Signal?

Antwort:

Frage 21

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 2

[v1 \(neueste\)](#)

Welche Frequenz in Hertz hat das dargestellte Signal?

Antwort:

Frage 22

Nicht beantwortet

Erreichbare Punkte: 2

[v1 \(neueste\)](#)

Welche Messzeit in Millisekunden wird horizontal insgesamt dargestellt?

Antwort:

III.2 Fragebogen 1 zur Erfassung der affektiven Merkmale

Allgemeiner Fragebogen

Liebe/r Student/in,

um das Vorpraktikum besser auf Deine Wünsche anzupassen, werden in der folgenden Umfrage Daten zu Deinen Vorerfahrungen und persönlichen Experimentierkenntnissen erhoben. Die Umfrage dauert ca. 10-15 Minuten und wird völlig anonym übermittelt. Bitte fülle alle Fragen wahrheitsgemäß und vollständig aus.

Vielen Dank im Voraus für Deine Mithilfe!

* Gibt eine erforderliche Frage an

1. Umfrage Passwort *

Fragebogen Vorbereitung Praktikum

Bitte gebe folgendes an:

2. Ersten beiden Buchstaben des Vornamens Deiner Mutter *

3. Ersten beiden Buchstaben des Vornamens Deines Vaters *

4. Tag des eigenen Geburtsdatums (zweistellig, z.B. 08) *

1. Soziodemographie

5. Geschlecht

Markieren Sie nur ein Oval.

- Männlich
- Weiblich
- Keine Angabe

6. Studiengang

 Dropdown

Markieren Sie nur ein Oval.

- Elektrotechnik
- Wirtschaftsingenieur ET/MB
- Computer Engineering
- Lehramt ET
- Physik

2. Gerätespezifisches Vorwissen und Vorbereitung Vorpraktikum

7. Ich habe mich auf das Praktikum vorbereitet *

Markieren Sie nur ein Oval.

- Ja
- Nein *Fahren Sie mit Frage 14 fort*

3. Folgende Informationsquellen zur Vorbereitung habe ich genutzt:

8. 3.1 Folgende Informationsquellen zur Vorbereitung habe ich genutzt:

Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.

- Script
- Internet(Wiki, Blog, ...)
- Versuchsanleitung
- Videos
- Vorpraktikum E-Labor
- Sonstiges: _____

9. 3.2 Bei Script oder Versuchsanleitung zu beantworten

Markieren Sie nur ein Oval pro Zeile.

trifft voll zu	trifft eher zu	teils	trifft eher nicht zu	trifft gar nicht zu
-------------------	-------------------	-------	-------------------------------	------------------------------

**Das Script / die
Versuchsanleitung /
die Literaturquellen
zur Vorbereitung auf
das Praktikum sind
ausreichend und in
guter Qualität
vorhanden.**

**Ich wusste, wo ich
die
Versuchsanleitungen
für das
bevorstehende
Praktikum suchen
muss.**

10. 3.3 Ich habe mich auf den Umgang mit Laborgeräten vorbereitet. *

Markieren Sie nur ein Oval.
 Ja

 Nein *Fahren Sie mit Frage 14 fort*

4. Ich habe mich auf den Umgang mit Laborgeräten vorbereitet ...

11. 4.1 ... , mit folgendem/folgenden Laborgerät/en.

Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.

- Vielfachmessgerät
- Netzteil
- Signalgenerator
- Videos
- Oszilloskop

Sonstiges: _____

12. 4.2 ... und mit folgenden Hilfsmitteln/Medien:

Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.

- Simulation
- Wikis, Blog, Handbuch, ...
- Real (E-Labor / eigenes Gerät)
- Sonstiges: _____

13. 4.3 Meine Vorbereitungszeit für das Praktikum pro Versuch beträgt:

Markieren Sie nur ein Oval.

- < 0,5 h
- 0,5 - 1,0 h
- 1,0 - 1,5 h
- 1,5 - 2 h
- > 2 h

Fahren Sie mit Frage 17 fort

5. Ich habe mich aus folgenden Gründen nicht vorbereitet:

14. 5.1 Ich habe mich aus folgenden Gründen nicht vorbereitet:

Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.

- Unwissenheit
- für unwichtig befunden
- unüberschaubare Angebote
- keine Zeit
- Sonstiges: _____

6. Ich kenne mich schon aus...

15. 6.1 (Ich kenne mich schon aus) ... durch:

Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.

- Hobby
- Schule
- Studium
- Ausbildung
- Sonstiges: _____

16. 6.2 (Ich kenne mich schon aus) ... mit:

Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.

- Vielfachmessgerät
- Netzteil
- Signalgenerator
- Oszilloskop
- Sonstiges: _____

7. Welche Erfahrungen hast Du bereits im Umgang mit Oszilloskopen?

17. Welche Erfahrungen hast Du bereits im Umgang mit Oszilloskopen? *

Markieren Sie nur ein Oval.

- Bislang keine Erfahrung
- Bereits ein Oszilloskop in der Schule / zu Hause gesehen
- Bereits mit einem Oszilloskop gearbeitet
- Nutze ich hin und wieder zum Messen und kenne die Grundfunktionen
- Mit unterschiedlichen Oszilloskopen vertraut und auch in der Lage damit konkrete Messungen vorzunehmen.

8. Experimentbezogene Selbstkonzept

18. Wie schätzt Du Dich selbst ein? *

Markieren Sie nur ein Oval pro Zeile.

trifft gar nicht zu	trifft eher nicht zu	teils teils	trifft eher zu	trifft völlig zu
------------------------------	-------------------------------	----------------	-------------------	------------------------

Mich würde das Experimentieren bestimmt interessieren, wenn nicht alles so kompliziert wäre.

Obwohl ich mir bestimmt Mühe gebe, fällt mir das Experimentieren schwer.

Das Vorbereiten auf ein Experiment fällt mir leicht.

Kein Mensch kann alles. Fürs Experimentieren habe ich einfach keine Begabung.

Bei manchen Experimenten, weiß ich von vornherein: "Das verstehe ich nie".

Anhand anschaulicher Experimente verstehe ich auch komplizierte naturwissenschaftliche Theorien.

Das Experimentieren liegt mir nicht besonders.

Für das Durchführen von Experimenten habe ich kein Händchen.

9. Sachinteresse „Experimentieren“

19. Gib bitte an, inwieweit folgende Aussagen auf Dich zutreffen. *

Markieren Sie nur ein Oval pro Zeile.

trifft	trifft			
gar	eher	teils	trifft	trifft
nicht	nicht	teils	eher zu	völlig
zu	zu			zu

**Wenn ich
experimentiere,
kann es
passieren,
dass ich gar
nicht merke,
wie die Zeit
verfliegt.**

**Wenn ich
Experimente
durchführen
kann, bin ich
bereit, auch
Freizeit dafür
zu verwenden.**

**Experimente
durchzuführen,
macht mir
einfach keinen
Spaß.**

20. 10. Hast Du im naturwissenschaftlichen oder technischen Bereich ein Hobby?

Markieren Sie nur ein Oval.

Ja

Nein

Fahren Sie mit Frage 21 fort

11. Überforderung

21. Gib bitte an, inwieweit folgende Aussagen auf Dich zutreffen.

Markieren Sie nur ein Oval pro Zeile.

	stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	weder noch	stimme eher zu	stimme vollkommen zu
Ich fühle mich nervös, wenn ich darüber nachdenke, in das Labor zu gehen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich mache mir Sorgen darüber, wie ich im Labor abschneiden werde.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich bin besorgt darüber, dass ich im Labor Schwierigkeiten haben werde.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich mache mir Sorgen darüber, was im Labor auf mich zukommt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich fühle mich nervös, wenn ich an bevorstehende Laboraufgaben denke.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich bin nervös, wenn ich experimentieren oder im Labor arbeiten muss.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich mache mir Sorgen darüber, wie ich bei Experimenten abschneiden werde.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich befürchte, dass ich Fehler bei der	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Durchführung
von
Experimenten
machen werde.

Ich mache mir
Sorgen darüber,
dass ich mich
im Labor
verletzen
könnte.

Ich fühle mich
unwohl bei der
Arbeit mit
gefährlichen
Substanzen
oder Geräten.

Ich bin besorgt
darüber, dass
ich im Labor
eine gefährliche
Situation
auslösen
könnte.

Ich fühle mich
unwohl, wenn
ich mit anderen
im Labor
interagieren
muss.

Ich mache mir
Sorgen darüber,
was andere von
mir im Labor
denken.

Ich bin nervös,
wenn ich im
Labor mit
anderen
kommunizieren
muss.

22. 12. Hast Du im naturwissenschaftlichen oder technischen Bereich ein Hobby?

Markieren Sie nur ein Oval.

Ja

Nein

Dieser Inhalt wurde nicht von Google erstellt und wird von Google auch nicht unterstützt.

[Google Formulare](#)

III.3 Fragebogen 2 zur Bewertung der App

Fragebogen PEARL

Liebe/r Student/in,

im Rahmen einer Studie zur Beurteilung der Qualität und des User Experience bitte ich Dich einige Fragen zur vorgestellten Augmented Reality (AR) App zu beantworten.
Bitte fülle den Bogen vollständig und so genau wie möglich aus.

Es werden keine, auf Deine Person zurückführbaren Daten erfragt, sämtliche Informationen vertraulich behandelt und nicht an Dritte weitergegeben.

* Gibt eine erforderliche Frage an

Fragebogen PEARL

Bitte gebe folgendes an:

1. Ersten beiden Buchstaben des Vornamens Deiner Mutter *

2. Ersten beiden Buchstaben des Vornamens Deines Vaters *

3. Tag des eigenen Geburtsdatums (zweistellig, z.B. 08) *

I. Soziodemographie und AR Vorerfahrung

4. Geschlecht

Markieren Sie nur ein Oval.

Männlich

Weiblich

keine Angabe

5. Studiengang

Dropdown

Markieren Sie nur ein Oval.

- Elektrotechnik
- Wirtschaftsingenieur ET/MB
- Computer Engineering
- Lehramt ET

6. Seit wann besitzt Du ein Smartphone/ Tablet (in Jahren)?

7. Welche(s) Smartphone oder Tablet (Betriebssystem) nutzt Du?

Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.

- Android
- IOS
- WindowsMobile
- BlackBerry
- Sonstiges
- Sonstiges: _____

8. Hast Du bereits eine Augmented Reality App genutzt?

Markieren Sie nur ein Oval.

- Ja
- Nein

9. Wie oft nutzt Du Dein Smartphone/ Tablet am Tag?

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5

sehr sehr häufig

10. Wofür nutzt Du das Smartphone/ Tablet?

Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.

- Unterhaltung
- Spiele
- Produktivität
- Kommunikation
- Social Media
- Organisation
- Sonstiges: _____

II. SUS - System Usability Scale

11. Gib bitte an, inwieweit folgende Aussagen auf Dich zutreffen. *

Markieren Sie nur ein Oval pro Zeile.

	stimme gar nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teils zu	stimme eher zu	stimme völlig zu
Ich denke, dass ich die AR App häufig verwenden möchte.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich fand die AR App unnötig komplex.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich fand die AR App einfach zu bedienen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich denke, dass ich die Unterstützung einer technischen Person benötigen würde, um diese AR-App nutzen zu können.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich fand die verschiedenen Funktionen in dieser AR App gut integriert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich dachte, dass diese AR- App zu viele Inkonsistenzen aufweist.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute sehr schnell lernen würden, diese AR-App zu verwenden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich fand die Verwendung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

der AR App
sehr
umständlich.

Ich war sehr
zuversichtlich,
die AR App zu
verwenden.

Ich musste
viele Dinge
lernen, bevor
ich mit dieser
AR-App
loslegen
konnte.

III. UEQ - User Experience Questionnaire

Die folgenden Fragen bestehen aus Gegensatzpaaren von Eigenschaften, die das Produkt haben kann. Entscheide möglichst spontan. Es ist wichtig, dass Du nicht lange über die Begriffe nachdenkst, damit Deine unmittelbare Einschätzung zum Tragen kommt.

Bitte kreuze immer eine Antwort an, auch wenn Du bei der Einschätzung zu einem Begriffspaar unsicher bist oder findest, dass es nicht so gut zum Produkt passt.

12. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

unei erfreulich

13. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

unve verständlich

14. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

krea phantasielos

15. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

leicht schwer zu lernen

16. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

wert minderwertig

17. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

lang spanned

18. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

unin interessant

19. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

unbe voraussagbar

20. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

schr langsam

21. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

orig konventionell

22. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

behi unterstützend

23. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

gut schlecht

24. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

kom einfache

25. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

abst anziehend

26. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

herk neuartig

27. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

unai angenehm

28. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

sich unsicher

29. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

aktiv einschläfernd

30. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

erw^o nicht erwartungskonform

31. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

ineff^o effizient

32. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

über verwirrend

33. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

unpr^o verwirrend

34. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

auf \square \square \square \square \square \square \square überladen

35. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

attr \square \square \square \square \square \square \square unattraktiv

36. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

Sym \square \square \square \square \square \square \square unsympathisch

37. *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5 6 7

kon \square \square \square \square \square \square \square innovativ

IV. Sonstige Fragen

38. Gib bitte an, inwieweit folgende Aussagen auf Dich zutreffen. *

Markieren Sie nur ein Oval pro Zeile.

	trifft gar nicht zu	trifft eher nicht zu	teils teils	trifft eher zu	trifft völlig zu
Die Instruktionen der App fand ich hilfreich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich hatte schnell einen Überblick über die verschiedenen Funktionen der App.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Funktionen der App sind selbsterklärend.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die App reagiert schnell auf Eingaben.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die App läuft stabil und zuverlässig, ohne Abstürze oder Eingabeverzögerungen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

39. Was hat Dir am besten gefallen?

40. Was hat Dir nicht gefallen?

41. Was hat Dir gefehlt?

42. Was könnte man noch anders oder besser machen?

43. Glaubst Du durch die AR App ausreichend auf den Umgang mit einem Oszilloskop vorbereitet zu sein? *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5

Triff Trifft voll zu

44. Würdest Du die App weiter empfehlen? *

Markieren Sie nur ein Oval.

1 2 3 4 5

Auf Auf jeden Fall

Dieser Inhalt wurde nicht von Google erstellt und wird von Google auch nicht unterstützt.

Google Formulare

TABELLE: $F_{(q_1, q_2)}$ -Verteilung für ein Signifikanzniveau von 5%

Nenner-Freiheitsgr.	Zähler Freiheitsgrade												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	245.9	248.0	250.1
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.43	19.45	19.46
3	10.13	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.786	8.703	8.660	8.617
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964	5.858	5.803	5.746
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735	4.619	4.558	4.496
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060	3.938	3.874	3.808
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637	3.511	3.445	3.376
8	5.318	4.459	4.066	3.836	3.687	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347	3.218	3.150	3.079
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137	3.006	2.936	2.864
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978	2.845	2.774	2.700
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854	2.719	2.646	2.570
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753	2.617	2.544	2.466
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.918	2.832	2.767	2.714	2.671	2.533	2.459	2.380
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602	2.463	2.388	2.308
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544	2.403	2.328	2.247
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494	2.352	2.276	2.194
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450	2.308	2.230	2.148
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.577	2.510	2.456	2.412	2.269	2.191	2.107
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.544	2.477	2.423	2.378	2.234	2.155	2.071
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348	2.203	2.124	2.039
21	4.325	3.467	3.072	2.840	2.685	2.573	2.488	2.420	2.366	2.321	2.176	2.096	2.010
22	4.301	3.443	3.049	2.817	2.661	2.549	2.464	2.397	2.342	2.297	2.151	2.071	1.984
23	4.279	3.422	3.028	2.796	2.640	2.528	2.442	2.375	2.320	2.275	2.128	2.048	1.961
24	4.260	3.403	3.009	2.776	2.621	2.508	2.423	2.355	2.300	2.255	2.108	2.027	1.939
25	4.242	3.385	2.991	2.759	2.603	2.496	2.405	2.337	2.282	2.236	2.089	2.007	1.919
26	4.225	3.369	2.975	2.743	2.587	2.474	2.388	2.321	2.265	2.220	2.072	1.990	1.901
27	4.210	3.354	2.960	2.728	2.572	2.459	2.373	2.305	2.250	2.204	2.056	1.974	1.884
28	4.196	3.340	2.947	2.714	2.558	2.445	2.359	2.291	2.236	2.190	2.041	1.959	1.869
29	4.183	3.328	2.934	2.701	2.545	2.432	2.346	2.278	2.223	2.177	2.027	1.945	1.854
30	4.171	3.316	2.922	2.690	2.534	2.421	2.334	2.266	2.211	2.165	2.015	1.932	1.841
31	4.160	3.305	2.911	2.679	2.523	2.409	2.323	2.255	2.199	2.153	2.003	1.920	1.828
32	4.149	3.295	2.901	2.668	2.512	2.399	2.313	2.244	2.189	2.142	1.992	1.908	1.817
33	4.139	3.285	2.892	2.659	2.503	2.389	2.303	2.235	2.179	2.133	1.982	1.898	1.806
34	4.130	3.276	2.883	2.650	2.494	2.380	2.294	2.225	2.170	2.123	1.972	1.888	1.795
35	4.121	3.267	2.874	2.641	2.485	2.372	2.285	2.217	2.161	2.114	1.963	1.878	1.786
36	4.113	3.259	2.866	2.634	2.477	2.364	2.277	2.209	2.153	2.106	1.954	1.870	1.776
37	4.105	3.252	2.859	2.626	2.470	2.356	2.270	2.201	2.145	2.098	1.946	1.861	1.768
38	4.098	3.245	2.852	2.619	2.463	2.349	2.262	2.194	2.138	2.091	1.939	1.853	1.760
39	4.091	3.238	2.845	2.612	2.456	2.342	2.255	2.187	2.131	2.084	1.931	1.846	1.752
40	4.085	3.232	2.839	2.606	2.449	2.336	2.249	2.180	2.124	2.077	1.924	1.839	1.744
41	4.079	3.226	2.833	2.600	2.443	2.330	2.243	2.174	2.118	2.071	1.918	1.832	1.737
42	4.073	3.220	2.827	2.594	2.438	2.324	2.237	2.168	2.112	2.065	1.912	1.826	1.731
43	4.067	3.214	2.822	2.589	2.432	2.318	2.232	2.163	2.106	2.059	1.906	1.820	1.724
44	4.062	3.209	2.816	2.584	2.427	2.313	2.226	2.157	2.101	2.054	1.900	1.814	1.718
45	4.057	3.204	2.812	2.579	2.422	2.308	2.221	2.152	2.096	2.049	1.895	1.808	1.713
50	4.034	3.183	2.790	2.557	2.400	2.286	2.199	2.130	2.073	2.026	1.871	1.784	1.687
55	4.016	3.165	2.773	2.540	2.383	2.269	2.181	2.112	2.055	2.008	1.852	1.764	1.666
60	4.001	3.150	2.758	2.525	2.368	2.254	2.167	2.097	2.040	1.993	1.836	1.748	1.649
70	3.978	3.128	2.736	2.503	2.346	2.231	2.143	2.074	2.017	1.969	1.812	1.722	1.622
80	3.960	3.111	2.719	2.486	2.329	2.214	2.126	2.056	1.999	1.951	1.793	1.703	1.602
90	3.947	3.098	2.706	2.473	2.316	2.201	2.113	2.043	1.986	1.938	1.779	1.688	1.586
100	3.936	3.087	2.696	2.463	2.305	2.191	2.103	2.032	1.975	1.927	1.768	1.676	1.573
200	3.888	3.041	2.650	2.417	2.259	2.144	2.056	1.985	1.927	1.878	1.717	1.623	1.516
400	3.865	3.018	2.627	2.394	2.237	2.121	2.032	1.962	1.903	1.854	1.691	1.597	1.488
500	3.860	3.014	2.623	2.390	2.232	2.117	2.028	1.957	1.899	1.850	1.686	1.592	1.482
1000	3.851	3.005	2.614	2.381	2.223	2.108	2.019	1.948	1.889	1.840	1.676	1.581	1.471

Interpretation: Die Tabelle liefert für verschiedene Zähler- (1. Zeile) und Nennerfreiheitsgrade (1. Spalte) die kritischen F_c -Werte einer F -verteilten Zufallsvariablen für ein Signifikanzniveau von 5%. *Quelle:* Die Tabelle wurde mit der Excel-Funktion FINV erzeugt.

Beispiel: Für 3 Zähler- und 10 Nennerfreiheitsgrade ist der kritische F -Wert $F_{0,05} = 3.708$, das heißt

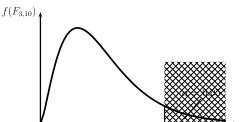


Abbildung 2: F-Verteilung für ein Signifikanzniveau von 5 %. Quelle: [Sto23]

IV Digitaler Anhang mit Verzeichnisstruktur



