

**Schülerlabor Neurowissenschaften –
Ein biologiedidaktisches Forschungs- und
Entwicklungsprojekt für die Oberstufe
in einer außerschulischen Lernumgebung**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften

vorgelegt beim Fachbereich Biowissenschaften
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
in Frankfurt am Main

von Sandra Anna Christine Zimmermann
aus Marburg

Frankfurt (2019)

(D 30)

vom Fachbereich Biowissenschaften (15) der

Johann Wolfgang Goethe-Universität als Dissertation angenommen.

Dekan: Prof. Dr. Sven Klimpel
Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main

Gutachter: Prof. Dr. Paul Dierkes
Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main

Zweitgutachter: Prof. Dr. Andreas Christian
Europa-Universität, Flensburg

Datum der Disputation:

Gender-Erklärung

*In der vorliegenden Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum für Schüler*innen und andere geschlechtsspezifische Bezeichnungen verwendet. Weibliche und nicht-binäre Geschlechtsidentitäten sind dabei ausdrücklich mitgemeint. In den Fragebögen der vorliegenden Arbeit ordneten sich alle Schüler*innen einem der binären Geschlechter zu. Bei der Auswertung einzelner Variablen im Hinblick auf Geschlechterunterschiede werden die Bezeichnungen männliche bzw. weibliche Schüler verwendet.*

Kurzzusammenfassung

Die Neurowissenschaften sind in Forschungsarbeiten für Schüler und Studierende immer wieder als eines der schwierigsten Teilgebiete der Biologie angeführt. Die Inhalte werden überwiegend nicht verstanden. Als mögliche Ursache gelten die seltenen praktischen Zugänge für die Lernenden aufgrund limitierter Ressourcen. Diese Ursache konnte in der vorliegenden Arbeit durch eine Befragung der Lehrkräfte zu ihren Praxisumsetzungen bestätigt werden. 70 % der Lehrkräfte gaben an, dass sie keine Experimente in der Schule zum Thema Nervenzellen anbieten. Experimente zur Verhaltensbiologie führen 65 % der Lehrkräfte nicht durch.

Um Schülern die Möglichkeit zu geben, sich praktisch-experimentell mit den Themenfeldern der Neuro- und Verhaltensbiologie auseinanderzusetzen, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Schülerlabortage („Schülerlabor Neurowissenschaften“) auf dem Feld der Neurowissenschaften konzipiert. Basierend auf dem Ansatz, die Themen der Neurowissenschaften in Schulen zielgerichtet zu stärken, wurden die Konzepte schülerorientiert umgesetzt und neurowissenschaftliche Forschung durch den eigenen Umgang mit modernen Forschungsapparaturen erfahrbar gemacht. Die drei Labortage für die Sekundarstufe II wurden wissenschaftlich begleitet: 1) *Verhaltensbiologie*, 2) *systemische Ebene der Elektrophysiologie*, 3) *elektrophysiologische Forschungsmethoden*. Der Labortag zur Verhaltensbiologie bietet Schülern die Möglichkeit, eigene Hypothesen und Untersuchungsdesigns zu entwickeln. So kann den Schülern der prozedurale Ablauf der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung vermittelt werden, um gezielt die Fähigkeiten in diesem Bereich zu stärken. Der Labortag zur systemischen Ebene der Elektrophysiologie bietet den Schülern die Möglichkeit, ihren eigenen Körper zu untersuchen und stellt damit einen Bezug zu ihrer Lebenswelt her. Der dritte Labortag legt besonderen Wert auf die Vermittlung authentischer elektrophysiologischer Forschungsmethoden, ein wissenschaftspropädeutischer Ansatz, um Schülern ein realistisches Bild neurowissenschaftlicher Forschung zu vermitteln.

Um die Qualität und Wirksamkeit der Labortage beurteilen zu können, wurden sie mit Feedback-Erhebungen begleitet ($n_{\text{Schüler}} = 381$, $n_{\text{Lehrkräfte}} = 49$). Die drei Labortage wurden sowohl von den Lehrkräften als auch von den Schülern bezüglich ihrer Qualität positiv bewertet. An nur wenigen Stellen finden sich unterschiedliche Bewertungen der einzelnen Labortage, die zugunsten des Labortags zur Verhaltensbiologie ausfallen. Für die Schüler konnte gezeigt werden, dass die Beurteilung weitgehend unabhängig von einem zugrunde liegenden Interesse an Biologie und Forschung ausfällt. Geringe Unterschiede finden sich zugunsten der sehr interessierten Schüler, was mit den Verständnisschwierigkeiten von elektrophysiologischen Konzepten begründet werden kann. Anhand einer

retrospektiven Erhebung wird außerdem gezeigt, dass alle drei Labortage eine höchst signifikante, selbsteingeschätzte Steigerung des „Wissens“, der „Anwendungszuversicht“ und des „Interesses“ bewirken. Schüler mit niedrigen Ausgangswerten zeigen einen besonders hohen Anstieg. Für das Interesse kann weiter gezeigt werden, dass auch Schüler mit hohem Ausgangswert eine große Interessenssteigerung durch den Labortag aufweisen. Das Interesse für den verhaltensbiologischen Labortag liegt etwas niedriger – die Labortage mit elektrophysiologischen Inhalten zeigen dagegen für die Anwendungszuversicht etwas niedrigere Werte.

Der Fokus der fachdidaktischen Forschung lag auf der Betrachtung des experimentellen Zugangs zur Elektrophysiologie über ein entwickeltes „EPhys-Setup“. Dabei handelt es sich um einen quasi-realen Messaufbau. Die Umsetzung kombiniert dazu Komponenten eines realen Elektrophysiologie-Setups (Hands-on Komponenten) mit einer speziell entwickelten schülerfreundlichen Software (Neurosimulation) und einem virtuellen Nervensystem in Form einer Platine. Als Modellnervensystem werden für diese Umsetzung Ganglien von *Hirudo medicinalis* verwendet – der Neurosimulation liegen originale elektrophysiologische Messspuren des Ganglions zugrunde. Experimentelle Vermittlungsansätze für die Elektrophysiologie finden sich kaum für den Schulbereich – eine Recherche zur entsprechenden Beforschung blieb ergebnislos, sodass sich hier ein besonderer Bedarf zeigt. Diesem Bedarf wurde mit verschiedenen Testinstrumenten nachgegangen, um den Vermittlungsansatz mit dem EPhys-Setup bewerten zu können. Dafür fand eine Wirksamkeitsanalyse durch die Erhebung der Motivation der Schüler statt (Lab Motivation Scale; Dohn et al. 2016). Von Bedeutung war auch, inwiefern gegenüber der Umsetzung eine Technologieakzeptanz vorliegt (Technology Acceptance Model; Davis 1989), die im Schulkontext ausgehend von der steigenden Einbindung von Technologien einen entsprechenden Forschungsbedarf aufweist. Weiter wurde untersucht, ob sich die Bewertung des EPhys-Setups (n = 160) von der Bewertung einer Kontrollgruppe (n = 75) unterscheidet. Für die Kontrollgruppe wurde die Neurosimulation von den Hands-on Komponenten gelöst und die Schüler arbeiteten ausschließlich PC-basiert. Die Ergebnisse zeigen, dass beide Umsetzungen die Motivation förderten und eine Technologieakzeptanz bei den Schülern aufwiesen. Der Unterschied der Untersuchungsgruppen fällt gering aus. Die Abhängigkeiten, die für die verwendete Simulationsumsetzung gefunden wurden, beziehen sich ausschließlich auf Komponenten der „Freude“. Somit wird der intrinsische Bereich, z. B. das „situationale Interesse“ der Motivationskala, von den Schülern die am EPhys-Setup gearbeitet haben höher bewertet. Außerdem fällt die Authentizitätswahrnehmung für das EPhys-Setup höher aus.

Zur weiteren Analyse der Testinstrumente wurde auch eine Abhängigkeit der Bewertung vom zugrunde liegenden Biologieinteresse sowie von den Computerfähigkeiten vergleichend betrachtet. Der

Einfluss auf die Bewertungen der drei Testskalen ist in vielen Fällen höher als der Einfluss der verwendeten Simulation. Vom individuellen Biologieinteresse der Schüler zeigen alle untersuchten Komponenten eine Abhängigkeit. Die größeren Effekte beziehen sich auf die Komponenten der „Lernwirksamkeit“ oder der „Freude“. Von den individuellen Computerfähigkeiten der Schüler zeigen Komponenten zur „Zuversicht bezüglich der Methoden und der Inhalte“ eine Abhängigkeit.

Für das Technology Acceptance Model wurde abschließend mit einem Strukturgleichungsmodell (SEM) überprüft, welche Einflussvariablen auf die beiden Kernkomponenten des Modells („wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“, PEOU; „wahrgenommene Nützlichkeit“, PU) wirken. Die Gütekriterien der Modellanalyse belegen, dass das Modell als plausibel gelten kann. Die „wahrgenommene Freude“ und die „Selbstwirksamkeit im Sinne des Lernerfolgs“ zeigen einen Einfluss auf PU. Die „wahrgenommene Freude“ sowie die „notwendigen Bemühungen“ für die Arbeit mit der Simulationsumsetzung zeigen einen Einfluss auf PEOU. Für die Computerfähigkeiten konnte im SEM kein Einfluss auf die Kernkomponenten nachgewiesen werden. Die vier untersuchten Einflussvariablen erklären 51 % der Varianz von PU und 44 % der Varianz von PEOU.

Abstract

Contemporary educational research has repeatedly found neuroscience being one of the most complex disciplines of the subject biology, for secondary school and university students alike. The lack of practical training due to limited resources has been discussed as a decisive factor for the difficulties in understanding the learning contents. In the frame of the present study, this finding has been confirmed by a survey conducted among biology teachers to evaluate the proportion of practical lessons in classes: 70 % of the teachers stated to not provide any practical experiments on the subject of neural cells and 65 % did not include experimental work in behavioural biology in their lessons.

One objective of this research work was to create an opportunity for students to approach the topics neurobiology and behavioural biology in a practical and experimental manner. Therefore, an out-of-school laboratory has been conceptualized ("*Schülerlabor Neurowissenschaften*"). Aiming to effectively promote neuroscience at schools the theoretical concepts were transferred into a learner-oriented model, allowing students to experience neuroscience by active handling of modern research devices. The three laboratory days for upper secondary level have been scientifically investigated: 1) *behavioural biology*, 2) *systemic level of electrophysiology*, 3) *electrophysiology research methodology*. The laboratory day covering *behavioural biology* provides the opportunity for students to come up with their own hypotheses and experimental set up. In that way, the overall process of gaining knowledge by conducting research can be directly experienced, which in turn positively affects the capacities of the students in scientific working. The laboratory day dealing with the *systemic level of electrophysiology* enables students to scientifically experience and examine their own bodies and thereby connect the complex theoretical contents of neuroscience with a real-life experience. The third laboratory day focuses on the transfer of knowledge about current research methodologies. Aiming to provide authentic insights into scientific work and allowing students to benefit from first-hand experience is considered one of the central tasks of scientific education.

In order to evaluate both quality and effectiveness of the approach, feedback surveys were conducted with participating students (n = 381) and teachers (n = 49). Results showed an overall positive assessment of the quality of all three practical training days. At only some points the laboratory day addressing behavioural biology has been evaluated with slightly higher values. For the students it could be shown that the feedback is largely independent of an underlying interest in biology and research. Students with interest in biology show slightly higher ratings that can be explained by the difficulty of understanding electrophysiological concepts. In addition, a retrospective self-evaluation

has shown that all three laboratory days resulted in a perceived significant increase of “knowledge”, “confidence in use” and “interest” among the students. Interestingly, students with lower baseline scores reported exceptionally strong increases for all three factors, however, with regard to the factor “interest” even students with high baseline values were found to experience a strong increase. The interest in the behavioural biology laboratory day is somewhat lower - laboratory days with electrophysiological content, on the other hand, show marginally lower levels of application confidence.

The focus of the didactic research was to evaluate the experimental approach to electrophysiology by using the devised EPhys-Setup, which is a quasi-real measurement setup. For the implementation elements of real electrophysiology setup (hands-on components) have been combined with specifically developed student-friendly software (neurosimulation) and a virtual neural system realized as a circuit board. Ganglions of *hirudo medicinalis* were used as a model for the realisation of the neural system – for the neurosimulation real electrophysiological data sets of ganglions were used. Experimental mediation approaches for electrophysiology are barely available in the education sector – an according search of related studies was unsuccessful, what again indicates a particular demand. This need was pursued by different methods to proof the mediation provided by the EPhys-Setup. Therefore, an efficacy analysis of students’ motivation was done (Lab Motivation Scale; Dohn et al. 2016). It was also important to find out to which extent there is a technology acceptance towards the implementation (Technology Acceptance Model; Davis 1989), assuming that increased integration of technology in the school life required more research. Further on, it was investigated if the evaluation of the EPhys-Setup differs from that of a control group. For the control group, the neurosimulation was separately from the hands-on components and the students only worked PC-based. The results show that both implementations promoted the motivation and exhibited a technology acceptance among the students. The differences between the test groups are small. A correlation for the used simulation implementation has only been found within the components of “enjoyment”. Consequently, the intrinsic realm, e. g. the situational interest of the motivation scale, is rated higher from those students working with the EPhys-Setup. Moreover, the authentic awareness is higher for the EPhys-Setup.

For further analysis, a comparative evaluation of the underlying interest in biology as well as of the computer self-efficacy was considered. The influence on the evaluation of the three scales of assessment is higher in many cases than the impact of the used simulation implementation. All evaluated components have shown dependence on the individual interest in biology. The biggest impacts are connected to the elements “learn effect” and “enjoyment”. From the individual

Abstract

computer self-efficacy, the components to “confidence into the methods and the content” show a dependency.

The technology acceptance model was verified by a structural equation modelling (SEM). It was reviewed which variables have impact on the core components of the model (“Perceived Ease of Use”, PEOU; “Perceived Usefulness”, PU). The quality-criteria of the model analysis prove that the model is reasonable. The “Perceived Enjoyment” and “Self-efficacy referring to the learning success” show an impact on PU. The “Perceived Enjoyment” and the “necessary Effort” to work with the simulation implementation show an impact on PEOU. The computer self-efficacy has shown no effect on the SEM regarding to the core components. The four evaluated variables explain 51 % of the variance of PU and 44% of PEOU.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	iii
Abstract.....	vi
Inhaltsverzeichnis.....	ix
Abkürzungsverzeichnis	xiii
Einleitung.....	1
Untersuchungsbedarf und zentrale Fragestellungen	1
Konzeptioneller Aufbau und Gliederung der Arbeit.....	9
Theoretische Grundlagen und aktueller Forschungsstand 12	
1 Außerschulische Lernorte.....	12
1.1 Schülerlabore.....	13
1.1.1 Forschung in Schülerlaboren.....	17
1.2 Authentische Forschungsexperimente	19
2 Neurobiologie im Bildungskontext	24
2.1 Verständnis- und Vermittlungsprobleme in der Neurobiologie	24
2.2 Vermittlungsansätze der Neurobiologie.....	27
2.3 Computerbasierte Lernumgebungen	32
2.3.1 Computerbasierte Lernumgebungen für die Vermittlung der Neurobiologie	40
2.4 Neurobiologie an außerschulischen Lernorten.....	53
2.4.1 Das untersuchte Schülerlabor – Goethe-BioLab.....	56
3 Motivation.....	57
3.1 Lab Motivation Scale.....	58
4 Technology Acceptance Model (TAM).....	60
4.1 Das TAM im Bildungskontext.....	64
Methoden	
68	
5 Das „Schülerlabor Neurowissenschaften“.....	68
5.1 Konzeption des Schülerlabors.....	68
5.2 Konzepte der Schülerlabortage.....	69

5.3	Das Elektrophysiologie-Setup	79
5.3.1	Aufbau EPhys-Setup.....	79
5.3.2	Virtuelles Präparat.....	81
5.3.3	Menügeführte Benutzeroberfläche (GUI) der Neurosimulation	82
5.3.4	Die vier exemplarisch untersuchten Nervenzellen	84
5.3.5	Versuchsprotokolle.....	85
5.3.6	Die Neurosimulation der Kontrollgruppe.....	87
5.3.7	Authentizität des EPhys-Setups	88
6	Wissenschaftliche Forschungsarbeit	91
6.1	Stichprobe	91
6.2	Befragungsinstrumente	92
6.2.1	Befragung der Lehrkräfte	92
6.2.2	Befragung der Schüler.....	93
6.3	Datenanalysen und Teststatistiken	100
	Ergebnisse	104
7	Befragung der Lehrkräfte.....	104
7.1	Experimente im Schulunterricht	104
7.2	Feedback-Erhebung der Lehrkräfte	107
8	Befragung der Schüler.....	109
8.1	Feedback-Erhebung der Schüler.....	109
8.2	Retrospektive Prä-Post-Erhebung des Lernzuwachses	117
8.3	Ergebnisse des offenen Feedbacks: Neuro?Logisch! - Elektrophysiologie.....	123
9	Befragung zu den Simulationsumsetzungen.....	124
9.1	Simulationsbewertung	124
9.1.1	Komponentenanalyse der Simulationsbewertung.....	126
9.2	Bewertung der Lab Motivation Scale.....	129
9.3	Bewertung des Technology Acceptance Model.....	134
9.4	Gruppenspezifische Einflüsse.....	138
10	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	140
11	Strukturgleichungsmodell des TAM	142
11.1	Methode und vorgeschlagenes Modell	142
11.2	Ergebnisse des SEM.....	148

11.3	Zusammenfassung der Ergebnisse des SEM.....	151
	Diskussion	152
12	Praxisanteil und Schülerexperimente	152
12.1	Neurobiologie an außerschulischen Lernorten.....	155
12.2	Forderung nach experimentellen Zugängen.....	156
12.3	Feedback der Lehrkräfte zu den SLT Konzepten.....	157
13	Feedback der Schüler.....	158
13.1	Qualität der SLT und Einfluss des „Ausgangsinteresses“	158
13.1.1	Lernklima und Lernzuwachs.....	161
13.1.2	Einblick in wissenschaftliche Forschungsarbeit.....	162
13.1.3	Lebenswelt der Schüler.....	163
13.2	Retrospektive	163
13.2.1	Gruppenspezifische Unterschiede	165
14	Bewertung der Hypothesen.....	166
15	Simulationsumsetzungen.....	167
15.1	Neurosimulation und EPhys-Setup.....	169
15.1.1	Motivationsgenerierung	169
15.1.2	Technologieakzeptanz	171
15.1.3	Einfluss der verwendeten Simulation.....	172
15.1.4	Einfluss auf die Feedback-Bewertungen.....	172
15.2	Abhängigkeit vom Biologieinteresse und den Computerfähigkeiten	173
15.2.1	Einfluss des Biologieinteresses.....	174
15.2.2	Einfluss der Computerfähigkeiten.....	175
16	Strukturgleichungsmodell.....	176
16.1	Der Einfluss von PC_SE.....	178
16.2	Korrelationsanalysen	180
17	Hypothesen Bewertung	182
18	Fazit und Ausblick	183
18.1	Feedback-Erhebung.....	183
18.2	EPhys-Setup und Neurosimulation.....	184
18.3	Ausblick.....	185

	Literaturverzeichnis	187
	Anhang	202
A	Sinnesphysiologie und Neurobiologie.....	202
B	Fragebogendokumentation	211
B.1	Befragung der Lehrkräfte.....	211
B.2	Befragung der Schüler – Feedback	213
B.3	Simulationsbewertung (nach Chen et al. 2016)	216
B.4	Lab Motivation Scale (nach Dohn et al. 2016)	218
B.5	Technology Acceptance Model (zurückgehend auf Davis 1985)	221
C	Verteilungstabellen.....	224
	Abbildungsverzeichnis	227
	Tabellenverzeichnis	229
	Danksagung	232
	Lebenslauf	234
	Erklärung und Versicherung	239

Abkürzungsverzeichnis

µm	Mikrometer
Abb.	Abbildung
Akz.	Akzeptanz
AP-Zelle	Anterior-Pagoda-Zelle
bzgl.	bezüglich
cm	Zentimeter
EA	Komponente „Enjoyment & Approval“ der Simulationsbewertung (Freude und Akzeptanz)
ECoG	Electrocorticography (Elektrokortikographie)
EEG	Elektroenzephalographie
EFF	Komponente „Effort“ der LMS (Bemühungen)
e. g.	For example
„Einblick“	Komponente „Einblick in wissenschaftliche Forschungsarbeit“ der Feedback-Erhebung
EKG	Elektrokardiographie
EMG	Elektromyographie
EPhys-Setup	Entwickeltes Elektrophysiologie Setup des SLT „Elektrophysiologie“
Ges	Gesamtschule
ggf.	gegebenenfalls
GK	Grundkurs
GUI	Guided User Interface (Menügeführte Benutzeroberfläche)
Gym	Gymnasium
i. d. R.	in der Regel
I/O-Board	Input/Output-Board
INT	Komponente „Interest“ der LMS (Interesse)
IQR	Interquartilsabstand
IT	Informationstechnologie
KMO	Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterium
LK	Leistungskurs
LMS	Lab Motivation Scale
LS	Likert-Skala
LVE	Lehrveranstaltungsevaluierung

Abkürzungsverzeichnis

M	Männlich
MDCUNE	Virtuelle Lernumgebung „ <i>Modular Digital Course in Undergraduate Neuroscience Education</i> “
Mdn	Median
mM	Millimolar
MRT	Magnetresonanztomographie
MW	Mittelwert
n	Stichprobengröße
n. s.	nicht signifikant
NIA	Virtuelle Lernumgebung „ <i>Neurons in Action</i> “
N-Zelle	Noxious-Zelle
o. Ä.	oder Ähnliches
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
PC_SE	Komponente „Computer Self-efficacy“ des TAM (Computerselbstwirksamkeit)
PCA	Principal component analysis (Hauptkomponentenanalyse)
PE	Komponente „Perceived Enjoyment“ des TAM (wahrgenommene Freude)
PEOU	Komponente „Perceived Ease of Use“ des TAM (wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit)
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
PU	Komponente „Perceived Usefulness“ des TAM (wahrgenommene Nützlichkeit)
P-Zelle	Pressure-Zelle
r	Effektstärke
R-Zelle	Retzius-Zelle
SD	Standardabweichung
SE_LE	Komponente „Self-efficacy“ der LMS (Selbstwirksamkeit im Sinne des Lernerfolgs)
Sek.	Sekundarstufe
SEM	Structural-equation-modeling (Strukturgleichungsmodell)
SLT	Schülerlabortag
SLT "Elektrophysiologie"	Schülerlabortag „Neuro?Logisch! – Elektrophysiologie“
SLT "Summenpotenzial"	Schülerlabortag „Neuro?Logisch! – Summenpotenziale“
SLT "Verhalten"	Schülerlabortag „Wir sind Verhaltensforscher“
SNNAP	Simulationssoftware „ <i>Simulator for Neural Networks and Action Potentials</i> “
„Strukturierung“	Komponente „Strukturierung von Inhalten und Anschaulichkeit“ der Feedback-Erhebung

TAM	Technology Acceptance Model (Technologieakzeptanzmodell)
u. a.	unter anderem
US	Komponente „Understanding“ der Simulationsbewertung (Verständnis)
V	Volt
vgl.	vergleiche
W	Weiblich
„Wissensvermittlung“	Komponente „Wissensvermittlung durch die Lehrperson“ der Feedback- Erhebung
WZ	Wissenszuwachs
z. B.	zum Beispiel
β	Regressionsgewicht

Einleitung

Untersuchungsbedarf und zentrale Fragestellungen

Die durchschnittlichen Ergebnisse deutscher Schüler in internationalen Vergleichsstudien (u. a. TIMMS: Baumert et al. 1998; Pisa: Baumert et al. 2001), vorrangig in den Naturwissenschaften, sorgten vor 20 Jahren für eine Welle von vielfältigen Initiativen zur Gründung außerschulischer Lernorte. Dabei fanden sich die Defizite der Schüler nicht schwerpunktmäßig im Faktenwissen, sondern in den naturwissenschaftlichen Kompetenzbereichen Arbeiten, Modellbildung und -anwendung sowie Problemlösefähigkeit (Ringelband et al. 2001). Neben diesen Defiziten ließ sich außerdem ein stetig sinkendes Interesse an den naturwissenschaftlichen Fächern feststellen. Das Ziel von außerschulischen Lernorten ist es u. a., dem nachlassenden Interesse entgegenzuwirken und dadurch ergänzend zur Schule einen Beitrag zur naturwissenschaftlichen Grundbildung der Schüler zu leisten. Zu den pädagogisch strukturierten Lernorten zählen auch die außerschulischen Mitmach-Labore, welche sich unter dem Begriff „Schülerlabor“ etabliert haben (vgl. Kapitel 1.1). Euler (2010) beschreibt, dass Schülerlabore trotz der großen Übereinstimmung in ihren Hauptzielen auch deutliche, fachbezogene Ausdifferenzierungen und Schwerpunkte aufweisen, welche die spezifische Problemlage der jeweiligen Fachrichtung abbilden. Weiter führt der Autor aus, dass die Biologie im Allgemeinen nicht gegen ein schlechtes Image ankämpfen muss und keine Nachwuchssorgen auftreten. Für den speziellen Bereich der Neurobiologie muss dies jedoch differenzierter betrachtet werden. Ein logisches und intuitives Verständnis davon, wie ein Ionengradient eine elektrische Potenzialdifferenz über biologische Membranen erzeugen kann, ist für Schüler bis hin zu Studierenden schwer zu erreichen und dieses Konzept wird mehrheitlich nicht verstanden (Cardozo 2016). Diesbezüglich wurde auch der Begriff der „*Neuroscience anxiety*“ geprägt, der die Angst der Lernenden vor Themen oder Kursen zur Neurowissenschaft kennzeichnet. Diese themenbezogene Angst kann wiederum Auswirkungen auf Kurs- und Studienwahl haben (Birkett und Shelton 2011) (vgl. Kapitel 2.1).

Der Ansatz von Biologie-Laboren, den Fokus im Besonderen auf die Vermittlung von Methodenkenntnissen zu legen und ein authentisches Bild der modernen Biologie als experimenteller Naturwissenschaft zu erzeugen (Euler 2010), kann dementsprechend auch für die Neurobiologie gelten. Molekularbiologie und Gentechnik werden von Euler (2010) als wichtige Themenbereiche angeführt, da diese mit schulischen Mitteln nur schwer experimentell erschlossen werden können. Die vorliegende Arbeit zeigt deutlich auf, dass dies ebenso für den Bereich der Neurowissenschaften zutrifft (vgl. Kapitel 2.3). Auch Universitäten unterliegen vielen der beschriebenen Limitationen in ihren

Ressourcen, die demzufolge auch im Rahmen eines Schülerlabors nicht umfassend überwunden werden können. Besonders ausschlaggebend sind die Aspekte der zeitlichen Limitation eines Schülerlabors und der Größe der teilnehmenden Kurse. Das selbstständige Experimentieren der Lernenden im Schülerlabor gehört jedoch zu den zentralen Methoden und ist ein kennzeichnendes Gestaltungsmerkmal. Eine Recherche zu außerschulischen Lernorten zeigt auf, dass nur 10 % der biologischen Lernorte Angebote zur Neurobiologie aufweisen (vgl. Kapitel 2.4). Um Schülern die Möglichkeit zu geben, sich praktisch-experimentell mit dem Themenfeld der Neurobiologie auseinanderzusetzen, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Schülerlabortage (SLT) auf dem Feld der Neurowissenschaften konzipiert („Schülerlabor Neurowissenschaften“, vgl. Kapitel 5). Die Konzepte wurden für verschiedene Jahrgangs- und Altersstufen schülerorientiert umgesetzt und neurowissenschaftliche Forschung durch den eigenen Umgang mit modernen Forschungsapparaturen erfahrbar gemacht. Die Angebote für die Sekundarstufe II wurden mit mehreren Erhebungen wissenschaftlich begleitet. Die konkreten Lernziele der einzelnen Angebote sind in Kapitel 5.2 ausführlich beschrieben. Der SLT „Wir sind Verhaltensforscher“ (im Folgenden als SLT „Verhalten“ bezeichnet) bietet den Schülern die Möglichkeit, eigene Hypothesen und Untersuchungsdesigns zu entwickeln. In Schiepe-Tiska et al. (2016) wird dieser Ansatz als forschend-entdeckender Unterricht beschrieben, in dem die zentrale Rolle des Experiments für die Naturwissenschaften berücksichtigt wird. So kann den Schülern an diesem SLT der prozedurale Ablauf der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung vermittelt werden, um ihre Fähigkeiten in diesem Bereich zu stärken. Der SLT „Neuro?Logisch! – Summenpotenziale“ (im Folgenden als SLT „Summenpotenzial“ bezeichnet) bietet den Schülern die Möglichkeit, ihren eigenen Körper zu untersuchen und damit einen Bezug zu ihrer Lebenswelt herzustellen. Dieser Bezug gilt als wichtiger Ansatzpunkt für den Aufbau naturwissenschaftlicher Kompetenzen (Schiepe-Tiska et al. 2016). Der SLT „Neuro?Logisch! – Elektrophysiologie“ (im Folgenden als SLT „Elektrophysiologie“ bezeichnet) legt besonderen Wert auf die Vermittlung authentischer Forschungsmethoden, um diesem wichtigen Ziel der naturwissenschaftlichen Bildung gerecht zu werden (vgl. Kapitel 1.2). Die drei Konzepte der SLT wurden mit Feedback-Erhebungen evaluiert, um die Qualität und Wirksamkeit der SLT beurteilen zu können sowie um Aussagen zu erhalten, die im weiteren Studienverlauf relevant sein könnten. Die zugrunde liegenden Forschungsfragen (F) lauteten:

F1a: Wie bewerten die Schüler die SLT der Sekundarstufe II hinsichtlich ihrer Qualität (Globalurteil, Atmosphäre, Lehrqualität, Vermittlung, wissenschaftlicher Anspruch)?

F1b: Gestaltet sich diese Bewertung für die drei SLT unterschiedlich?

F2: Hängt die Bewertung des SLT von dem zugrunde liegenden Interesse an Biologie und Forschung ab?

F3a: Wie bewerten die Schüler den Lernzuwachs, den sie durch den SLT erlangen?

F3b: Gestaltet sich diese Bewertung für die drei SLT unterschiedlich?

Die Konzepte der SLT decken viele definierte Ziele für außerschulische Lernorte und/oder Schülerlabore ab (vgl. Kapitel 1). Gemäß der formulierten Ziele für außerschulische Lernorte (Braund und Reiss 2006) werden im Besonderen die erweiterte und authentische praktische Arbeit und der Zugang zu seltenem Material und echter Forschung berücksichtigt. Bezüglich der formulierten Ziele für Schülerlabore (Euler 2005) finden sich:

- 1)** eine selbstständige Auseinandersetzung mit authentischen Forschungszusammenhängen und Arbeitsweisen im Rahmen aktivierender Lernformen;
- 2)** eine Vermittlung eines zeitgemäßen Bildes von Naturwissenschaften und Technik;
- 3)** die Gelegenheit, Tätigkeitsfelder und Berufsbilder im naturwissenschaftlich-technischen Bereich kennen zu lernen.

Es wird demzufolge davon ausgegangen, dass sich die SLT dem Erfolg von Schülerlaboren anschließen können und von den Schülern positiv erlebt werden. In der Mehrzahl der Forschungsarbeiten auf diesem Feld kann eine kurz- oder mittelfristige Steigerung des Interesses gefunden werden (u. a. Engel 2004). Bereits in der Entwicklungsphase des „Schülerlabors Neurowissenschaften“ wiesen die Erhebungen zur Konzeptionsverbesserung der SLT überwiegend positive Bewertungen auf. Zwei der untersuchten SLT behandeln umfassend das Thema Elektrophysiologie. In der vorliegenden Arbeit wird ausführlich beschrieben, dass Lernende Verständnisprobleme hinsichtlich der Thematik aufweisen (vgl. Kapitel 2.1). Griff (2018) sieht das Problem u. a. im Fehlen eines grundlegenden Verständnisses der physikalischen und chemischen Prinzipien, die für das Erfassen neurophysiologischer Konzepte erforderlich sind. Diese Probleme könnten die Bewertung jener SLT beeinflussen, in denen physikalische und chemische Grundlagen für die Vermittlung der Elektrophysiologie behandelt werden. Weiterhin wird vermutet, dass das zugrunde liegende Interesse der Schüler keinen signifikanten

Einfluss auf die Bewertung zeigt. Beispielsweise konnte Pawek (2011) zeigen, dass die Beurteilung der Schülerlabormerkmale unabhängig von den anfänglichen Dispositionen (Interesse und Fähigkeitsselbstkonzept) ausfällt. Zur Wirksamkeit von Schülerlaboren, konnten beispielsweise Glowinski (2007) und Scharfenberg (2005) einen Wissenserwerb nachweisen. Folgende Hypothesen (H) wurden demzufolge formuliert:

H1a: Die SLT werden von den Schülern hinsichtlich ihrer Qualität positiv bewertet.

H1b: Bei dieser Bewertung spielen inhaltliche Komponenten des jeweiligen SLT eine Rolle.

H2: Das zugrunde liegende Interesse an Biologie und Forschung spielt in der Bewertung der SLT hinsichtlich ihrer Qualität keine signifikante Rolle.

H3a: Die SLT sind bei den Schülern mit einem selbsteingeschätzten Lernzuwachs verbunden.

H3b: Bei dieser Einschätzung spielen inhaltliche Komponenten des jeweiligen SLT eine Rolle.

Der Fokus der wissenschaftlichen Forschung der vorliegenden Arbeit liegt auf der Betrachtung des entwickelten Elektrophysiologie-Setups (EPhys-Setup), das am SLT „Elektrophysiologie“ zum Einsatz kommt (vgl. Kapitel 5.3). Ausgehend von den in der Literatur weitreichend beschriebenen Verständnisproblemen bezüglich der Elektrophysiologie liegt hier ein besonderer Forschungsbedarf bezüglich neu entwickelter Vermittlungsansätze vor (vgl. Kapitel 2.1 und 2.2). Praktische Umsetzungen zur Entstehung und Messung von elektrischen Potenzialen bieten die Möglichkeit, den Verständnisproblemen entgegenzuwirken (u. a. Marzullo und Gage 2012; Shannon et al. 2014). Allerdings gestaltet sich die Umsetzung von forschungsnahen authentischen Experimenten für die Elektrophysiologie aufgrund limitierter Ressourcen (Raum, Zeit, Geld, Expertise) im Schulkontext schwierig (u. a. Chinn und Malhotra 2002; Hofstein und Lunetta 2004; Marzullo und Gage 2012). Auch im Kontext eines Schülerlabors lässt sich der Mangel an einfachen, überzeugenden und kostengünstigen Werkzeugen, mit denen elektrophysiologische Messungen durchgeführt werden könnten, nicht einfach umgehen und für das eigenständige Experimentieren ist eine adäquate Ausstattung mit mehreren Setups notwendig. Die Recherche zu angebotenen neurobiologischen Versuchen an außerschulischen Lernorten ergab, dass Schüler an nur vier (2 %) der biologischen Lernorte die Möglichkeit haben, Erfahrungen mit intrazellulären elektrophysiologischen Messungen zu machen (vgl. Kapitel 2.4). Eine alternative Möglichkeit der Vermittlung von elektrophysiologischen Inhalten bieten

computerbasierte Ansätze (Lewis 2014) (vgl. Kapitel 2.3). Daher wurde im Rahmen des „Schülerlabors Neurowissenschaften“ eine schülergerechte computerbasierte Neurosimulation (vgl. Hayes et al. 2003) entwickelt (vgl. Kapitel 5.3.3). Die Sichtung der einschlägigen Literatur ergab, dass die Konzeptionen und die damit verbundenen Forschungen vornehmlich im Bereich der Hochschullehre liegen. Die Simulationen der „*Virtual Physiology Series*“ stellen die einzigen Programmierungen dar, die – im Rahmen der durchgeführten Recherche – explizit auch für den Bildungsbereich der Schule entwickelt wurden und dort zum Einsatz kommen. Die Studie zur Simulation „*SimNerv*“ fand jedoch wiederum mit Studierenden statt (Braun 2003) (vgl. Kapitel 2.3.1). Der mögliche Einsatz von Neurosimulationen im Schulbereich ist demnach ein offenes Forschungsfeld, das insofern von Interesse ist, als es Schülern einen Zugang zu elektrophysiologischen Messungen bieten kann, die wie oben beschrieben ansonsten nicht umsetzbar sind. Der Einsatz solcher Simulationen wird unterschiedlich bewertet. Einerseits begegnen die Simulationen den limitierten Ressourcen sowie technischen und methodischen Schwierigkeiten (u. a. Lewis 2014) und Studien weisen die Effektivität der Methodik zur Vermittlung von neurophysiologischen Prinzipien nach (u. a. Grisham 2009; Jong et al. 2013; Stuart 2009). Auf der anderen Seite besteht eines der Hauptargumente gegen die Verwendung von Simulationen in den fehlenden Hands-on Komponenten. Es wird argumentiert, dass Lernende die Verwendung bestimmter Tools nicht mit Mausclicks üben und somit wichtige experimentelle oder technische Fähigkeiten nicht erlernt werden können (Braun 2003; Lewis 2014). Nach Braun (2003) ist dies auch mit der besten Computersimulation nicht zu erreichen. Andere Autoren sehen ein Problem in der künstlichen Säuberung der Daten und der fehlenden biologischen Variation und Heterogenität. Dadurch würden die Lernenden keine Möglichkeit haben, mit untypischen, schlechten oder „falschen“ Daten umzugehen und daraus Lernerfahrungen zu generieren (Chinn und Malhotra 2002; Lewis 2014; vgl. Kapitel 2.3). Die fehlende Heterogenität der Daten oder natürliche Methodenschwierigkeiten wurden in einige Simulationen integriert. Zur Generierung einer Heterogenität werden die dargestellten Ergebnisse komplexer berechnet. Die zum Teil eingebundenen Methodenschwierigkeiten finden sich z. B. in Simulationen der Mikroelektrode, beschädigten Zellen oder Abnutzungsphänomenen (u. a. Barry 1990; Braun 2003). Ansätze, die fehlende Echtheit der Daten zu kompensieren, finden sich in Simulationen, in denen der Datenberechnung die Ergebnisse realer aufwändiger Forschungsexperimente zugrunde liegen (u. a. Demir 2006; Grisham 2009; Mar Quiroga und Price 2016) (vgl. Kapitel 2.3.1).

Die für die vorliegende Arbeit entwickelte Neurosimulation versucht, den genannten Kritikpunkten auf neue Art und Weise zu begegnen. Anstelle einer Berechnung von Forschungsdaten werden reale Messspuren ausgewählter Experimente direkt in die Simulation eingebunden. Die Schüler haben dadurch Zugriff auf authentische Forschungsdaten, in denen eine natürliche Heterogenität sowie

Messungenauigkeiten vorliegen, mit denen sie sich auseinandersetzen müssen. Dadurch wird eine entsprechende Lernerfahrung generiert. Weiterhin wurde der Aufbau eines realen Elektrophysiologie-Setups durch die Verbindung der Neurosimulation mit Hands-on Komponenten so authentisch wie möglich nachempfunden (EPhys-Setup, vgl. Kapitel 5.3.7). Damit werden die häufig bemängelten geringen Praxiskomponenten aufgegriffen. Der Einfluss der Hands-on Komponenten war im Rahmen der vorliegenden Arbeit von besonderem Interesse. Die konzipierte Umsetzung des EPhys-Setups (mit Hands-on / Setup-Gruppe; vgl. Kapitel 5.3.1) wurde daher mit der Neurosimulation ohne Hands-on Komponenten (PC-Gruppe; vgl. Kapitel 5.3.6) verglichen. Der Einfluss auf die Motivation und die Technologieakzeptanz wurde diesbezüglich untersucht.

Die Motivation gilt als eine der Grundlagen für die Bereitschaft des Lernens. Aus entwicklungsorientierter Perspektive kommt der Kenntnis- und Fähigkeitsstand eines Schülers durch zwei Gruppen von Einflussfaktoren zustande. Die erste Gruppe bezieht sich auf die bereits zu Beginn der Lern- und Ausbildungsphase vorhandenen Kenntnisse, Fähigkeiten, Lernstrategien usw. Der zweite Einflussfaktor liegt in der Anstrengungsbereitschaft bzw. der Dauer und Intensität der Lernbemühungen – der Lernmotivation. Sie ist für die Aufrechterhaltung von Lernaktivitäten von entscheidender Bedeutung. Die Kenntnisse und Fähigkeiten werden demnach immer wieder aufs Neue von motivationalen Faktoren bestimmt (Krapp 2003; Pintrich 2003). Um den beschriebenen Defiziten in den neurobiologischen Kenntnissen und Fähigkeiten von Lernenden zu begegnen, kann die Motivation dementsprechend eine wichtige Rolle dabei spielen, die Bereitschaft zu fördern, sich mit den Inhalten intensiver auseinanderzusetzen und demzufolge eine Verbesserung ihrer Kenntnisse zu erzielen. Dahingehend wurden mit Fokus auf das EPhys-Setup folgende Forschungsfragen formuliert:

F4a: Fördert die Arbeit mit dem EPhys-Setup/der Neurosimulation die Motivation der Schüler?

F4b: Steigert die Arbeit mit Hands-on Laborkomponenten die Motivation?

F4c: Besteht ein Zusammenhang zwischen der Motivation und den zugrunde liegenden Computerfähigkeiten und/oder dem Biologieinteresse?

„Motivation ist die Bezeichnung für Beweggründe menschlichen Handelns. Einzelne Beweggründe heißen Motive (...). Richten sich Motive auf Sachverhalte, so hat man es mit Interesse zu tun“ (Killermann et al. 2009, S. 64). Das Konzept der Motivation überschneidet sich demnach mit dem Interessensbegriff. Das Interessenskonzept stellt eine inhaltspezifische motivationale Variable der pädagogischen Psychologie dar. Die Qualität der intrinsischen Motivation ist einer der Hauptgründe dafür, eine interessensbezogene Handlung auszuführen (Krapp 2007).

Die meisten empirischen Studien belegen die Annahme, dass die Durchführung von praktischen Aktivitäten die Motivation steigert. Beispielhaft sei die Studie von Vogt et al. (1999) angeführt, in der untersucht wurde, wie interessant unterschiedliche Phasen des Biologieunterrichts von Schülern wahrgenommen wurden. Dabei wurden Phasen mit Experimenten oder praktischen Arbeiten besonders positiv bewertet. Auch Renner et al. (1985) befragten Schüler über ihre Gefühle in Bezug auf Lernaktivitäten. Die Laborarbeit wurde hier als „interessant“ bewertet, wohingegen Unterrichtsformate wie Filme schauen oder dem Lehrer zuhören als „langweilig“ eingestuft wurden. Itzek-Greulich und Schwarzer (2016) zeigen in ihrer WiSS-Studie (Wirksamkeit Schülerlabor-Schule), dass praktischer Unterricht sowohl in der Schule als auch im Schülerlabor die Motivation weckt – der Effekt im Schülerlabor scheint jedoch nachhaltiger. Neurosimulationen ermöglichen den Schülern aktivere Erfahrungen als die traditionell eingesetzte Vermittlung der Inhalte über Arbeitszettel (Deal et al. 2014). Der Aufbau des konzipierten EPhys-Setups integriert Hands-on Komponenten. Hands-on Aktivitäten können nachweislich das Interesse fördern (u. a. Holstermann et al. 2010). Damit verbunden ist der Vorteil der taktilen Informationen, die nach der Theorie der mentalen Repräsentation die Entwicklung von konzeptuellem Wissen fördern (u. a. Jong et al. 2013; Ma und Nickerson 2006). Hands-on Komponenten sollten auch die Motivation der Schüler fördern, indem ein Gefühl der Kompetenz gemäß der Selbstbestimmungstheorie vermittelt wird (u. a. Ryan und Deci 2000b). Pintrich (2003) diskutiert, welche Faktoren eine Rolle für die Motivation im Lehr-Lern-Kontext spielen. Darunter findet sich u. a. der Einfluss der Selbstwirksamkeit, des persönlichen Werts sowie des Interesses und der intrinsischen Motivation. Die eingesetzte Lab Motivation Scale (LMS) überprüft diese drei Komponenten (Dohn et al. 2016). Der persönliche Wert zum Erreichen gewünschter Ziele – wie das Bestehen eines Kurses – ist durch die Behandlung von für die Schüler prüfungsrelevanten Themen gegeben (Klausuren, Abitur). Die Selbstwirksamkeit kann im Kontext der zugrunde liegenden Computerfähigkeiten eine Rolle spielen. Die Selbstwirksamkeit der LMS bezieht sich auf den Lernerfolg, der wie oben beschrieben für die SLT erwartet wird. Dem folgend wurden nachstehende Hypothesen formuliert:

H4a: Die Arbeit mit dem EPhys-Setup/der Neurosimulation fördert die Motivation der Schüler.

H4b: Die Hands-on Laborkomponenten des EPhys-Setups steigern die Motivation.

H4c: Die zugrunde liegenden Computerfähigkeiten sowie das Biologieinteresse beeinflussen die Motivation.

Durch die wachsende Abhängigkeit von computergestützten Systemen und die zunehmende Geschwindigkeit bezüglich der Einführung neuer Technologien hat die Benutzerakzeptanz von Technologien auch heute noch eine bedeutende Relevanz. Trotz der Vielfalt der Modelle, in denen die Einflussfaktoren und die Mechanismen der Nutzung von Technologien erklärt werden, dominiert das „Technology Acceptance Model“ (TAM; Davis 1989) die Forschung (Taherdoost 2018) (vgl. Kapitel 4). Dies trifft auch auf die Forschung im Bildungskontext zu (Granić und Marangunić 2019), wie z. B. im E-Learning Bereich (Šumak et al. 2011) (vgl. Kapitel 4.1). Diwakar et al. (2014) untersuchten mit dem TAM eine virtuelle neurobiologische Lernumgebung (vgl. Kapitel 2.3.1) und zeigten, dass das TAM auch in diesem spezifischen neurobiologischen virtuellen Labor-Kontext als Modell zur Erklärung der Benutzerakzeptanz einen sinnvollen Einsatz findet. „Akzeptanz“ kann differenziert werden in Einstellungs- und Verhaltensakzeptanz. Die Einstellungsakzeptanz umfasst eine affektive (motivational-emotionale), eine kognitive (Kosten-Nutzen-Rechnung) und eine konative (handlungsorientierte) Komponente. Die Verhaltensakzeptanz begründet sich aus der Verhaltensintention. Von Verhaltensakzeptanz wird aber erst dann gesprochen, wenn Innovationen in Form eines beobachtbaren Verhaltens (z. B. Nutzung) angenommen werden (Müller-Böling und Müller 1986). Die Akzeptanz ist dementsprechend wichtig für die motivationale und für die handlungsorientierte Komponente, die wiederum Einfluss darauf haben, wie intensiv sich der Schüler mit der verwendeten Simulationsumsetzung und seinen Inhalten beschäftigen wird. Die Kernkomponenten des TAM, über die eine Verhaltensintention vorhergesagt werden soll, sind durch die „wahrgenommene Nützlichkeit“ und die „wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“ beschrieben.

Granić und Marangunić (2019) haben ein aktuelles Review zum Einsatz des TAM im Bildungskontext veröffentlicht. Untersuchungen mit Schülern, wie sie in der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden, finden sich nur bei 4 % der Studien. Die Technologieakzeptanz im Schulkontext weist ausgehend von der steigenden Einbindung von Technologien jedoch einen entsprechenden Forschungsbedarf auf (vgl. Kapitel 4.1). Dementsprechend wurden folgende Forschungsfragen formuliert:

F5a: Ist mit dem EPhys-Setup/der Neurosimulation eine Technologieakzeptanz verbunden?

F5b: Steigert die Arbeit mit Hands-on Laborkomponenten die Technologieakzeptanz?

F5c: Besteht ein Zusammenhang zwischen der Technologieakzeptanz und den zugrunde liegenden Computerfähigkeiten und/oder dem Biologieinteresse?

Einige Studien zu Neurosimulationen weisen eine positive Bewertung der Lernenden bezüglich des Einsatzes der Technologie nach (vgl. Kapitel 2.3.1). Die Simulationsumsetzung von Barry (1994)

empfanden die Studierenden als angenehm und hilfreich für das Verständnis des Themas. Der vergleichende Ansatz von Schwab et al. (1995) weist die höchsten Bewertungen der Qualität für die eingesetzte Simulation auf. Als lohnende Lernerfahrung wird die Neurosimulation von McGrath et al. (2003) bewertet und von den Studierenden der Wunsch nach mehr computerbasierten Umsetzungen geäußert. Newman und Newman (2013) evaluierten die Nützlichkeit der eingesetzten Neurosimulation, die auch als Kernkonstrukt des TAM definiert ist. Die Studierenden bewerteten die Simulation als außergewöhnlich, sehr nützlich und/oder zufriedenstellend. Diwakar et al. (2014) zeigen mit dem auch in der vorliegenden Arbeit eingesetzten TAM, dass die Studierenden die virtuelle neurobiologische Lernumgebung als relativen Vorteil beim Lernen der neurophysiologischen Inhalte im Vergleich zu der traditionellen Klassenraum-Bildung bewerteten. In Anlehnung an die Selbstbestimmungstheorie (Ryan und Deci 2000b), sollten die Hands-on Komponenten des EPhys-Setups durch gesteigertes Interesse sowie durch ein Gefühl der Kompetenz eine gesteigerte Motivation hervorrufen, die auch zu einer erhöhten Akzeptanz führt. Weiterhin ist von Relevanz, dass Abdullah und Ward (2016) in ihrer Metaanalyse zeigen, dass die beiden Kernkomponenten des TAM maßgeblich von den „Computerfähigkeiten“ und der „wahrgenommenen Freude“ beeinflusst werden. Während der Beschäftigung mit einem Interessensgegenstand werden positive Emotionen wie Freude erlebt (Schiefele und Krapp 1996). Demnach wird das zugrunde liegende Biologieinteresse einen Einfluss auf die „wahrgenommene Freude“ aufweisen. Daraus resultierend wurden folgende Hypothesen formuliert:

H5a: Die Schüler weisen gegenüber dem EPhys-Setup/der Neurosimulation eine Technologieakzeptanz auf.

H5b: Die Hands-on Laborkomponenten des EPhys-Setups steigern die Technologieakzeptanz.

H5c: Die zugrunde liegenden Computerfähigkeiten sowie das Biologieinteresse beeinflussen die Technologieakzeptanz.

Konzeptioneller Aufbau und Gliederung der Arbeit

In den theoretischen Grundlagen und der Beschreibung des Forschungsstands werden zunächst außerschulische Lernorte beschrieben, wobei eine Schwerpunktsetzung auf dem Themenkomplex Schülerlabore liegt. In diesem Zusammenhang werden die gemeinsamen Zielsetzungen und

Unterschiede dargestellt. Auch ein Überblick über die bisherige Forschungsarbeit in Schülerlaboren wird gegeben. Aufbauend auf dem Ziel von Schülerlaboren, einen Zugang zu authentischen Forschungsexperimenten zu bieten, wird die Thematik anschließend im Detail betrachtet, da dieses Ziel aufgrund der angestrebten authentischen Umsetzung des EPhys-Setups von besonderem Interesse ist.

Die Neurobiologie im Bildungskontext ist Gegenstand der weiteren Betrachtung, da sie die inhaltliche Komponente des neurobiologisch ausgerichteten Schülerlabors darstellt. Ausgehend von den vielfältig beschriebenen Verständnis- und Vermittlungsproblemen werden mögliche Vermittlungsansätze aufgeführt, die den Verständnisproblemen entgegenwirken oder eine neuartige Vermittlungsoption aufzeigen. Die Möglichkeit der computerbasierten Vermittlung wird aufgrund der thematischen Nähe zur vorliegenden Arbeit anschließend im Detail betrachtet. Zunächst findet dazu eine generelle Auseinandersetzung mit computerbasierten Ansätzen statt, in der die Vor- und Nachteile gegenübergestellt werden. Anschließend werden konkrete computerbasierte Ansätze aus dem Bereich der Neurobiologie vorgestellt und anhand von unterschiedlichen Gestaltungskriterien eingeordnet. Abschließend wird eine Übersicht bezüglich neurobiologischer Angebote in Schülerlaboren in Deutschland gegeben.

Auf der Grundlage der eingesetzten Erhebungsinstrumente der Lab Motivation Scale und des Technology Acceptance Model werden für den theoretischen Rahmen kurz die relevanten Motivationstheorien beschrieben und im Speziellen die LMS erläutert. Für die Technologieakzeptanz wird das TAM erläutert, sein Einsatz im Bildungskontext beschrieben und Ergebnisse dieses Forschungsbereiches werden aufgezeigt.

Die Methodenbeschreibungen beginnen mit der Darstellung der Konzepte für das „Schülerlabor Neurowissenschaften“ sowie seiner einzelnen Angebote. Die SLT für die Sekundarstufe I wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht wissenschaftlich begleitet, gehören aber zum Gesamtkonzept des „Schülerlabors Neurowissenschaften“ und werden daher an dieser Stelle kurz erläutert.

Es schließen sich die Entwicklung und die Konzepte der Neurosimulation sowie des EPhys-Setups im Detail an. Dabei wird auch auf die Inhalte und Versuche eingegangen, die mit den Schülern bei der Arbeit mit den Simulationsumsetzungen behandelt werden. In Anlehnung an die vorangegangene Beschreibung von authentischen Forschungsexperimenten wird betrachtet, inwieweit das EPhys-Setup Kriterien der Authentizität erfüllt. Abschließend wird das EPhys-Setup auch in Bezug auf die dargestellten Gestaltungskategorien von computerbasierten Ansätzen bewertet. Der letzte Abschnitt der Methodenbeschreibung stellt detailliert die Stichprobe, die eingesetzten Befragungsinstrumente, das Untersuchungsdesign sowie die durchgeführten Datenanalysen und Teststatistiken dar.

Die daraus resultierenden Ergebnisse der Arbeit finden sich im darauf folgenden Abschnitt. Einleitend werden Ergebnisse einer Befragung der Lehrkräfte vorgestellt, die die Relevanz außerschulischer Lernorte mit dem Fokus Neurowissenschaften unterstreichen. Ausgehend von den experimentellen Anteilen in der Schule wird der Bedarf an SLT dargestellt. Außerdem wird die Rückmeldung der Lehrkräfte zu den drei SLT der Sekundarstufe II gezeigt. Das entsprechende Feedback der Schüler schließt daran an. Darauf aufbauend werden die Ergebnisse der Erhebungen zum EPhys-Setup bzw. zur Neurosimulation des SLT „Elektrophysiologie“ gezeigt. Für eine genauere Betrachtung von möglichen Einflussvariablen auf die beiden Kernkomponenten „wahrgenommene Nützlichkeit“ und „wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“ des TAM wird ein Strukturgleichungsmodell berechnet, bei dem die zuvor gebildeten Komponenten der Hauptkomponentenanalysen zusammengeführt werden.

Nach Darstellung der Ergebnisse werden die zentralen Aspekte diskutiert und zueinander in Bezug gesetzt. Den Abschluss bilden ein Fazit der Untersuchung und ein Ausblick auf mögliche resultierende Forschungsfragen sowie eine Beschreibung von bereits begonnenen sich anschließenden Konzepten.

Theoretische Grundlagen und aktueller Forschungsstand

1 Außerschulische Lernorte

Die durchschnittlichen Ergebnisse deutscher Schüler in internationalen Vergleichsstudien (u. a. TIMMS: Baumert et al. 1998; Pisa: Baumert et al. 2001), vorrangig in den Naturwissenschaften, sorgten vor 20 Jahren für eine Welle von vielfältigen Initiativen zur Gründung außerschulischer Lernorte. Dabei finden sich die Defizite der Schüler nicht schwerpunktmäßig im Faktenwissen, sondern in den naturwissenschaftlichen Kompetenzbereichen Arbeiten, Modellbildung und -anwendung sowie Problemlösefähigkeit (Ringelband et al. 2001). Neben diesen Defiziten ließ sich außerdem ein stetig sinkendes Interesse an den naturwissenschaftlichen Fächern feststellen. Braund und Reiss (2006) fassen dies in ihrem Research Report zusammen und halten fest, dass in vielen Ländern das Interesse an naturwissenschaftlichen Fächern in der Schule mit zunehmendem Alter sinkt und immer weniger Schüler sich für ein naturwissenschaftliches Studium entscheiden. Sie geben außerdem zu bedenken, dass die gegenwärtigen Ansätze zu langweilig, irrelevant und überholt seien. Pawek (2011) ergänzt, dass sich sogar von den naturwissenschaftlich hochkompetenten Schülern nur wenige für die Disziplinen interessieren (vgl. Prenzel 2008). Das Ziel der außerschulischen Lernorte ist es u. a., dem nachlassenden Interesse entgegenzuwirken und dadurch ergänzend zur Schule einen Beitrag zur naturwissenschaftlichen Grundbildung der Schüler zu leisten. „*Unter außerschulischen Lernorten werden Orte außerhalb der Schule verstanden, in denen Kinder und Jugendliche anschauliche Lernerfahrungen machen können*“ (LernortLabor 2019). Die Möglichkeiten des schulischen und außerschulischen Lernens sollen miteinander verbunden werden. Braund und Reiss (2006, S. 1376) definieren fünf Ziele für außerschulische Lernorte, die es idealerweise zu erfüllen gilt:

- 1) Verbesserte Entwicklung und Integration von fachlichen Konzepten;
- 2) Erweiterte und authentische praktische Arbeit;
- 3) Zugang zu seltenem Material und echter Forschung;
- 4) Einstellung gegenüber naturwissenschaftlichen Fächern in der Schule: Förderung von weiterem Lernen;
- 5) Soziale Auswirkungen: Zusammenarbeit und Verantwortung für das Lernen.

Itzek-Greulich und Schwarzer (2014) geben jedoch zu bedenken, dass dies in der Praxis kaum umfassend gelingen kann. Zudem gilt zu beachten, dass Lernen außerhalb der Schule nicht aufhört und

somit eigentlich jedes Umfeld, in dem Lernen möglich ist, auch ein Lernort sein kann (LernortLabor 2019).

1.1 Schülerlabore

Zu den pädagogisch strukturierten Lernorten zählen neben Museen, zoologischen Gärten u. a. auch die außerschulischen Mitmach-Labore, welche sich unter dem Begriff „Schülerlabor“ etabliert haben. Sie werden verstanden als *„außerschulische Einrichtungen, in denen sich Schülerinnen und Schüler durch eigenes Experimentieren im Rahmen schulischer Veranstaltungen mit modernen Naturwissenschaften, Ingenieurwissenschaften, Mathematik und Informationstechnologie auseinandersetzen können. Dazu zählen Angebote in Universitäten, Fachhochschulen, Forschungseinrichtungen, Museen, Science Centern, Technologie- und Gründerzentren und der Industrie, die in geeigneten Laboren Begegnungen mit diesen Feldern ermöglichen“* (Dähnhardt et al. 2009, S. 8). Die Schüler besuchen die Labore i. d. R. mit ihren Lehrkräften im Klassenverband, meistens einmalig und halb- oder ganztägig (Itzek-Greulich 2014), dabei sind die Labore nicht an feste Schulstrukturen gebunden und verfügen über Freiheiten in der Gestaltung des Lernumfeldes (Euler 2005; 2010). Die Lernorte sind häufig professionell ausgestattet und die Schüler werden von Wissenschaftlern der jeweiligen Einrichtung betreut. Die gegebenen Rahmenbedingungen können Schulen meist nicht bieten. *„Die (angebotenen) Themen sind dabei unterschiedlich eng an die Lehrpläne angelehnt, das Spektrum reicht hier von einem engen Lehrplanbezug der Experimente bis hin zu aktuellen Forschungsthemen, die in den Lehrplänen noch gar nicht berücksichtigt sind“* (Glowinski 2007, S. 7). Haupt et al. (2013) fassen zusammen, dass Schülerlabore sich im Idealfall dadurch auszeichnen, dass sie Schülern die Möglichkeit zur Auseinandersetzung mit moderner Wissenschaft erlauben, gut ausgerüstete Labore zur Verfügung stellen und die Schüler selbstständig experimentieren können.

Diese Lernumgebungen erfreuen sich großer Beliebtheit, woraus eine exponentiell steigende Anzahl von Einrichtungen seit ihrer Entstehung in den 60er Jahren resultierte (Dähnhardt et al. 2009). Einen Überblick über die Schülerlabore in Deutschland bietet das Internetportal des vom BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) geförderten Projekts „LELA-Lernort Labor“. Dort werden aktuell rund 380 bestehende Schülerlabore in Deutschland gelistet. Dabei sind die Angebote im MINT-Bereich besonders vielfältig; LernortLabor erfasst 369 Labore in diesem Bereich (Stand: September 2019), welche im LernortLabor-Atlas (2019) aufgeführt werden (**Abbildung 1**). **Tabelle 1** gibt einen Überblick über die Verteilung auf die Bundesländer.



Abbildung 1: Standorte der Schülerlabore in Deutschland
(LernortLabor-Atlas 2019; Stand: Oktober 2019).

Tabelle 1: Verteilung der außerschulischen Labore auf die Bundesländer in Deutschland
(nach LernortLabor-Atlas 2019, Stand: September 2019).

Baden-Württemberg	45	Niedersachsen	38
Bayern	37	Nordrhein-Westfalen	96
Berlin	24	Rheinland-Pfalz	24
Brandenburg	12	Saarland	13
Bremen	8	Sachsen	16
Hamburg	9	Sachsen-Anhalt	6
Hessen	15	Schleswig-Holstein	25
Mecklenburg-Vorpommern	8	Thüringen	4

Eine Klassifizierung der Schülerlabore gestaltet sich schwierig, da sich hinter dem Begriff sehr vielfältige Einrichtungen mit unterschiedlichen Ausrichtungen und Zielen verbergen. LernortLabor (2019)

sieht als Gemeinsamkeiten der Schülerlabore, eine dauerhaft anspruchsvolle Laboreinrichtung anzubieten, eine fachliche Begleitung zu gewährleisten und die Möglichkeit für Schüler, selbstständig zu experimentieren. Darüber hinaus gestalten sich die Schülerlabore sehr unterschiedlich. LernortLabor (2019) kategorisiert die MINT-Schülerlabore dazu in 8 Typen (vgl. Haupt et al. 2013): Klassische Schülerlabore, Schülerforschungszentren, Lehr-Lern-Labore, Labore zur Wissenskommunikation, Schülerlabore mit Bezug zum Unternehmertum und Schülerlabore mit Berufsorientierung.

Die Labore weisen also eine große Vielfalt durch unterschiedliche Entstehungsgeschichten, Träger, Ziele, Zielgruppen und Inhalte auf. Doch trotz der großen Diversität und der unterschiedlichen Schwerpunkte können auch gemeinsame Zielsetzungen gefunden und formuliert werden. Euler (2005, S. 4) fasst diese zusammen (vgl. Dähnhardt et al. 2009, S. 14):

- Förderung von Interesse und Aufgeschlossenheit der Jugendlichen für Naturwissenschaften und Technik;
- Selbstständige Auseinandersetzung mit authentischen Forschungs- und Entwicklungszusammenhängen und Arbeitsweisen im Rahmen aktivierender Lernformen;
- Vermittlung eines zeitgemäßen Bildes von Naturwissenschaften und Technik und ihrer Bedeutung für unsere Gesellschaft und deren Entwicklung;
- Gelegenheiten bieten, Tätigkeitsfelder und Berufsbilder im naturwissenschaftlich-technischen Bereich kennen zu lernen;
- Schaffung von Möglichkeiten des Dialogs und der Auseinandersetzung mit aktuellen, z. T. kontrovers diskutierten Themen naturwissenschaftlicher Forschung.

Zu den von Braund und Reiss (2006) genannten Zielen außerschulischer Lernorte kommt Schülerlaboren demnach die spezifische Aufgabe hinzu, einen Beitrag zur Berufsbildung zu leisten. Priemer et al. (2007, S. 1) fassen zusammen, dass „*das Wecken, die Sicherung und die Erhöhung des Interesses Jugendlicher an naturwissenschaftlichen Themen*“ das Hauptziel aller Labore ist, um dem festgestellten schwindenden Interesse der Jugendlichen an den naturwissenschaftlichen Fächern entgegenzuwirken und zur Sicherung des Nachwuchses für naturwissenschaftliche Studiengänge und Berufe beizutragen. Sie sehen außerdem die Möglichkeit zur Entwicklung, Erprobung und Evaluation von naturwissenschaftsdidaktischen Konzepten sowie zur Aus- und Fortbildung von Lehrkräften (vgl. Guderian und Priemer 2008). Engeln und Euler (2004, S. 46) erwähnen zudem, dass die Labore viele derjenigen Kriterien erfüllen, „*die unter lerntheoretischer Perspektive als relevant für eine aktive Wissenskonstruktion durch die Lernenden angesehen werden, wie z. B. Verknüpfung von Wissenserwerb mit Anwendungszusammenhängen, kooperatives Problemlösen sowie Gelegenheiten zum*

Verfolgen eigener Ansätze“. Die Ziele sprechen demnach wissenschaftsbezogene, gesellschaftliche und bildungstheoretische Ebenen an.

Euler (2010, S. 801f) beschreibt, auf welche Prinzipien und Gestaltungsmerkmale die Laborbetreiber zum Erreichen dieser anspruchsvollen Ziele setzen:

- Begegnung mit moderner Naturwissenschaft und Technik durch erfahrungsbasierte Zugänge zu Prozessen der Forschung und Entwicklung. Dabei spielen Experimente, praktische Aktivitäten und projektartige Arbeitsformen eine zentrale Rolle;
- Schaffen eines Lernumfelds, das zur aktiven Auseinandersetzung mit möglichst lebensweltbezogenen, authentischen Problemen aus Forschung und Entwicklung anregt;
- Bieten von Lerngelegenheiten und Möglichkeiten zur Erfahrung und Entfaltung individueller Stärken im Rahmen von Team- und Projektarbeit mit dem Ziel, fachliche und überfachliche Kompetenzen (hard und soft skills) gleichermaßen zu fördern;
- Ermöglichen persönlicher Kontakte mit Personen, die in Forschung und Entwicklung tätig sind, sowie das Erfahren von möglichen Rollenmodellen, insbesondere für Mädchen und junge Frauen.

Euler (2010) geht aber auch darauf ein, dass Schülerlabore trotz der großen Übereinstimmung in ihren Hauptzielen deutlich fachbezogene Ausdifferenzierungen und Schwerpunkte aufweisen, welche die spezifische Problemlage der jeweiligen Fachrichtung abbilden. Für den Bereich der Biologie beschreibt er, dass diese nicht gegen ein schlechtes Image in den Naturwissenschaften ankämpfen muss und keine Nachwuchssorgen aufzuweisen hat. Die Defizite fänden sich vielmehr *„in der Vertrautheit biologisch interessierter Jugendlicher mit experimentellen naturwissenschaftlichen Methoden“* (Euler 2010, S. 803). Entsprechend setzen viele Biologielabore in der Sekundarstufe II an und zielen *„dabei besonders auf die Vermittlung von Methodenkenntnissen und von einem authentischen Bild der modernen Biologie als experimenteller Naturwissenschaft“* (Euler 2010, S. 803). Seiner Meinung nach liegen damit die Schwerpunkte der Labore vor allem im Bereich der Molekularbiologie und Gentechnik, da diese Gebiete sich besonders schnell weiter entwickeln und mit schulischen Mitteln nur schwer experimentell erschließen lassen.

1.1.1 Forschung in Schülerlaboren

Die Heterogenität der Schülerlabore bringt eine ebenso heterogene Begleitforschung mit sich, die eine hohe Diversität mit Fokussierung auf unterschiedliche Aspekte aufweist. Nachdem Engeln (2004) als Vorreiterin im deutschsprachigen Raum in ihrer Dissertation eine Wirksamkeitsstudie bezüglich der expandierenden Schülerlabore anfertigte, folgten zunächst nur einzelne Arbeiten, die auf demselben Feld forschten (u. a. Brandt 2005; Guderian 2007; Scharfenberg 2005). Diese Arbeiten konzentrieren sich auf den Aspekt der Wirksamkeitsanalyse. Gleichzeitig fordern sie alle, dass die Beforschung der Schülerlabore und ihre Wirksamkeit mehr Beachtung benötigt, um zu überprüfen, ob die angedachten Ziele der Labore erreicht werden und den Aufwand rechtfertigen, der mit ihnen verbunden ist; bzw. ob die Struktur und Konzeption der Labore entsprechend korrigiert werden muss. Daraufhin ist die Beforschung des außerschulischen Lernorts Schülerlabor in den letzten Jahren immer mehr in den Fokus der Fachdidaktiken gerückt (Itzek-Greulich und Schwarzer 2016). Derweil finden sich so viele Forschungsarbeiten in diesem Bereich, dass eine vollständige Darstellung der Ergebnisse im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht angestrebt wird, sondern nur ein Überblick gegeben werden soll. Guderian und Priemer veröffentlichten 2008 ein Review über die bis dahin angefertigten Forschungsarbeiten zur Interessenentwicklung (sowie Motivation und Akzeptanz) und Nickolaus und Mokhonko gaben 2016 in einem Tagungsbeitrag eine aktuellere Zusammenfassung in Form eines kritischen Fazits über die bis dahin veröffentlichten Ergebnisse zur Wirksamkeit von Schülerlaboren. Eine gute Zusammenfassung findet sich auch in Pawek (2009) und Priemer und Pawek (2014). Neben der Interessenentwicklung (u. a. Engeln und Euler 2004; Glowinski 2007; Pawek 2009) wurden u. a. die Einbindung in den Unterricht (Glowinski 2007; Guderian 2007), die Motivation (u. a. Brandt 2005; Zehren 2009), das Fähigkeits-selbstkonzept (u. a. Brandt 2005; Pawek 2009), die Akzeptanz (Scharfenberg 2005), der Wissenserwerb (Glowinski 2007; Scharfenberg 2005) und das Naturwissenschaftsverständnis (Zehren 2009) sowie Laborvariablen (z. B. Gefallen am Labor, Relevanz der Inhalte, Selbstständigkeit der Arbeit im Labor) erhoben. So zeigt sich insgesamt ein eher heterogenes Bild der Forschung, was zum einen an den unterschiedlichen Ausrichtungen der Schülerlabore liegt, aber nach Guderian und Priemer (2008) auch auf die nur wenig konkreten Zielvorstellungen von Schülerlaboren zurückzuführen ist. Gemeinsam ist dabei aber den meisten Arbeiten der Fokus auf Wirksamkeitsstudien.

In der Mehrzahl der Arbeiten kann eine Steigerung des Interesses oder anderer affektiver Persönlichkeitsmerkmale gefunden werden. Jedoch sind diese Effekte häufig nur kurz- oder mittelfristig und fallen in den Ergebnissen der Follow-up Erhebungen häufig wieder ab (u. a. Brandt 2005; Engeln 2004; Glowinski 2007; Guderian 2007; Scharfenberg 2005). Pawek (2011) beschreibt dagegen

sehr nachdrücklich, dass er in seinen Studien im DLR-School-Lab einen weitgehend stabilen Effekt der emotionalen und wertbezogenen Komponenten des aktuellen Interesses ein Jahr nach der Intervention nachweisen konnte. Effekte für den Bereich des Selbstkonzepts zeigen sich ebenfalls nicht einheitlich. So findet sich u. a. bei Brandt (2005) keine Nachhaltigkeit, wohingegen Pawek (2011) auch hier beschreibt, dass das Selbstkonzept in seiner Studie nicht signifikant absinkt. Des Weiteren zeigt er für die DLR-School-Labs, dass die Beurteilung der Schülerlabormerkmale unabhängig von den anfänglichen Dispositionen ist und diese Lernumgebung damit von naturwissenschaftlich interessierten und uninteressierten Schülern gleichermaßen positiv eingeschätzt wird (vgl. Pawek 2009). Glowinski (2007) und Guderian (2007) zeigen auf, dass eine enge Einbindung des Laborbesuchs in den Unterricht einen zusätzlich positiven Effekt haben könnte und das Potenzial aufweist, die Effekte auch zu stabilisieren. Itzek-Greulich und Schwarzer (2016) fassen die Ergebnisse der groß angelegten randomisierten WiSS-Studie (Wirksamkeit Schülerlabor-Schule) bezüglich der erfassten Variablen „Lernleistung“ und „Motivation“ zusammen. Der Lernerfolg war dabei unabhängig vom Lernort, sodass die Leistungen sich nicht von den Kontrollgruppen in der Schule unterschieden (vgl. Scharfenberg 2005). Ebenfalls vom Lernort unabhängig zeigten sich die Lernemotionen und das wahrgenommene Kompetenzerleben. Praktischer Unterricht weckte sowohl in der Schule als auch im Schülerlabor die Motivation, dabei scheint der Effekt im Schülerlabor nachhaltiger zu sein. Priemer et al. (2007) zeigen, dass die Ergebnisse auch vom Fach abhängig sind und das Interesse für Physik und Chemie – wie auch in der Schule – deutlich geringer ausfällt als für die anderen naturwissenschaftlichen Fächer. Des Weiteren zeigen sie auf, dass unterschiedliche Angebote in ein und demselben Schülerlabor unterschiedlich wirken können.

Nickolaus und Mokhonko (2016) fassen insgesamt kritisch zusammen: *„Vor diesem Hintergrund ist es zweifelhaft, dass außerschulische Laborangebote in Verbindung mit dem Unterricht in einer längerfristigen Perspektive tatsächlich im Bereich der Interessen und Berufsorientierungen nachhaltige Effekte erzielen. Deutlich leichter dürften nach den vorliegenden Ergebnissen Effekte im Bereich der Kompetenzentwicklung zu erzielen sein“* (S. 518). Guderian und Priemer (2008) sehen das Hauptproblem in der Kurzfristigkeit der Effekte auf affektiver Ebene. Euler (2005) beschreibt dazu, dass Dauer und Einmaligkeit des Laborbesuchs nachhaltige Wirkungen der Intervention eher unwahrscheinlich machen. *„Um Schülerlaborbesuche effektiver zu gestalten, müssen daher Ansatzpunkte gefunden werden, die eine langfristige Wirkung erreichen“* (Guderian und Priemer 2008, S. 34). Jedoch muss dabei auch beachtet werden, dass nicht alle Angebote eines Schülerlabors die gleiche Zielsetzung haben (vgl. Euler 2010). Zum Beispiel möchte ein Projekt über Genforschung in der Biologie mehr informieren und aufklären und weniger potenziellen Nachwuchs gewinnen (Guderian und Priemer 2008).

1.2 Authentische Forschungsexperimente

Das selbstständige Experimentieren der Lernenden gilt für den Bereich des außerschulischen Lernens im Schülerlabor als eine zentrale Methode und ist ein wesentliches Gestaltungsmerkmal des Aufenthalts. Allgemein geht es bei einem Experiment um dynamische Abläufe, wobei der Experimentator die Bedingungen verändert. In der Wissenschaft werden Experimente zur Erkenntnissuche eingesetzt (Killermann et al. 2009). Als zentrale Erkenntnismethode in den Naturwissenschaften ist das Experiment auch Gegenstand des naturwissenschaftlichen Unterrichts. Durch eigenständiges Experimentieren kann eine handlungsorientierte Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand stattfinden (Spörhase-Eichmann und Ruppert 2004). Die Funktion von Experimenten in den Naturwissenschaften und im naturwissenschaftlichen Unterricht gestaltet sich in der Regel unterschiedlich (vgl. Killermann et al. 2009). In den Naturwissenschaften gibt es keine Standardmethode für das Experimentieren, vielmehr gilt es, aus der Vielfalt der Methoden die für die Klärung einer Forschungsfrage passende herauszufiltern. Im Schulexperiment dient das Experiment i. d. R. der selbstständigen Überprüfung von in der Wissenschaft bereits bekannten Ergebnissen und demnach der Veranschaulichung (Chinn und Malhotra 2002). Killermann et al. (2009) geben einen Überblick über die unterschiedlichen Funktionen von Experimenten im Biologieunterricht (**Abbildung 2**).

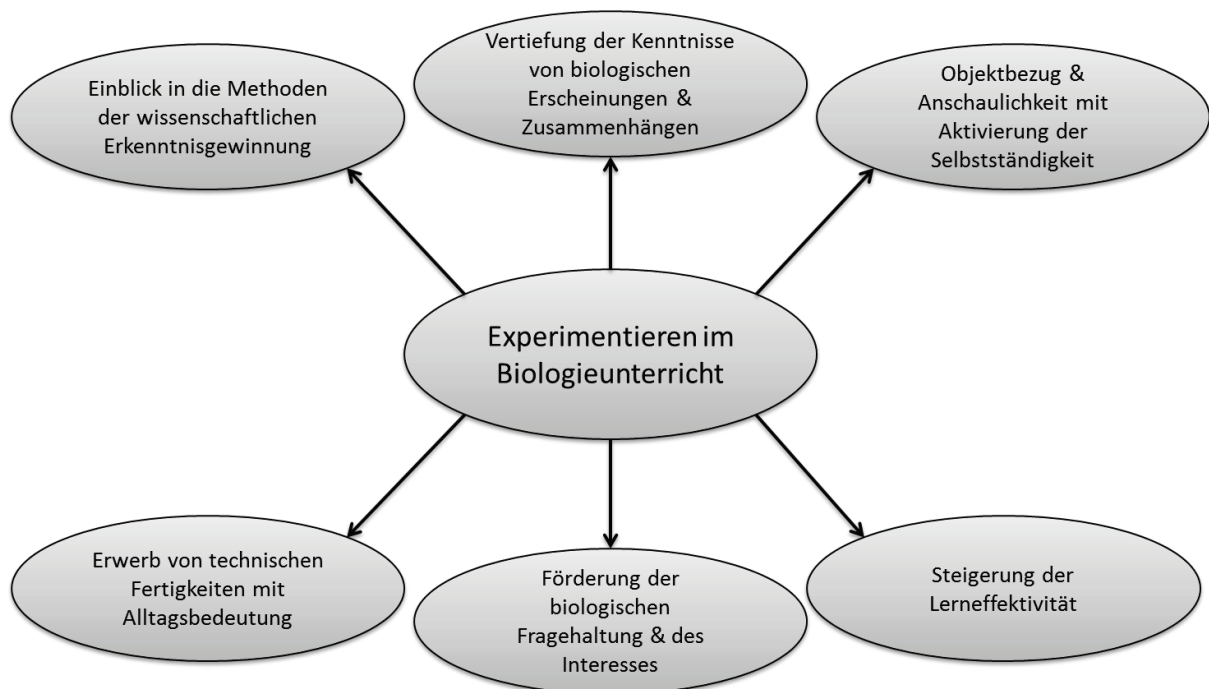


Abbildung 2: Die zentralen Funktionen von Experimenten im Biologieunterricht
(nach Killermann et al. 2009).

Auf diese Weise lässt sich darstellen, dass es nicht nur um eine reine Wissensgenese geht, sondern die Funktionen darüber hinausgehend vielfältige Bedeutungen haben.

Für Glowinski (2007) sind die Verbindung von Theorie und Praxis, der Einblick in naturwissenschaftliche Arbeitsweisen sowie der Erwerb experimenteller Fähigkeiten die entscheidenden Argumente für das Durchführen von Experimenten im Unterricht. Darüber hinaus beschreibt sie auch, dass die motivations- und interessenfördernde Wirkung des Schülerexperiments als bedeutsam erachtet wird (vgl. Euler 2005). Die Funktion von Experimenten als methodische Schlüsselrolle in Erkenntnisprozessen und zur Steigerung des Schülerinteresses sowie zur Förderung von Lernprozessen und Einsichten wird in der Arbeit von Euler (2005) jedoch eher kritisch betrachtet. Er beschreibt die Problematik des Experimentierens im Schulunterricht, wo Experimente meist stark geführt und mit rezeptartiger Vorgehensweise vermittelt werden (vgl. Hodson und Bencze 1998; Hofstein und Lunetta 2004). Auf diese Weise kann seiner Meinung nach das Experiment weder die lern- und motivationsfördernde Funktion erfüllen noch kann ein hinlänglich induktives Bild von Wissenschaft gebildet werden. Zudem fördert die rein imitierende Laboraktivität seiner Ansicht nach keine Kompetenz der wissenschaftlichen Arbeitsweisen (vgl. Engeln und Euler 2004). Auch Hofstein und Lunetta (2004) beschreiben in ihrem aktualisierten Review über die Laborarbeit in der Wissenschaftslehre ein nach wie vor bestehendes Problem für den Lernerfolg beim Experimentieren: Schüler sehen als grundsätzliches Ziel, der Versuchsanleitung genau zu folgen bzw. die richtige Antwort herauszufinden. So fehle es an einem Verständnis für den Zusammenhang zwischen Versuchsdesign, den zu überprüfenden Hypothesen und dem vorhandenen Vorwissen. Die von Hofstein und Lunetta (2004) aufgezeigten Probleme führen jedoch auch dazu, dass die Schüler keinen authentischen Einblick in wissenschaftliche Forschungsarbeit und -methoden erhalten. Die rezeptartigen Vorgehensweisen vermitteln ein Bild von Wissenschaft, in dem Beobachtungen und Experimentieren geradlinig verlaufen. Die Schüler generieren so Fehlvorstellungen von wissenschaftlicher Forschung sowie dem Berufsfeld eines Wissenschaftlers (vgl. Chinn und Malhotra 2002). Chinn und Malhotra (2002) beschreiben in ihrem Diskussionsbeitrag den Unterschied zwischen authentischen Forschungsexperimenten und den in der Lehre verbreiteten Experimenten, welche sie nochmals unterteilen in „simple experiments“, „simple observations“ und „simple illustrations“. Dabei fokussiert der Beitrag die Unterschiede bezüglich der kognitiven Prozesse und der Erkenntnistheorien. Die gefundenen großen Unterschiede sind für die Autoren eine Erklärung für die fehlerhafte Vorstellung von Schülern bezüglich wissenschaftlicher Forschung, da sie ein Bild entwickeln, nach welchem Forschung simpel, sicher, algorithmisch und fokussiert auf die oberflächlichen Beobachtungen ist.

Hodson (u. a. 1996, 1998) formuliert zur Bedeutung von praktischer Arbeit drei wesentliche Ziele für das Experimentieren in Schullaboren, wobei er der Meinung ist, dass jedes der Ziele unterschiedliche Ansätze benötigt und nicht zwangsläufig ein Ansatz alle Ziele abdecken kann bzw. muss:

- **Learning science:**
 - der Erwerb konzeptuellen Wissens aus der Verbindung von Theorie und Praxis.
- **Learning about science:**
 - der Einblick in naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen über das Experimentieren.
- **Doing science:**
 - der Erwerb von praktischen Fähigkeiten sowie Kenntnisse über die Anwendung von Methoden und Problemlösestrategien.

In Schülerlaboren, die an Universitäten oder in Forschungsinstituten eingerichtet sind, kann das Experimentieren als Schnittstelle zwischen wissenschaftlichen, forschungsrelevanten Experimenten und Unterrichtsexperimenten betrachtet werden. Da die Wissenschaft gerade für Schüler abstrakt ist und häufig als lebensfern gilt, soll mit dieser Brücke die moderne Wissenschaft besser zugänglich und erlebbar werden. Durch die Fragestellungen, die Anleitung von Wissenschaftlern sowie die äußeren Bedingungen (Labor, Geräte und Methoden) erreichen die Experimente einen hohen wissenschaftspropädeutischen Anspruch und können als forschungsnah angesehen werden (Glowinski 2007). Diese Grundidee, die möglichst auf eigenständigen experimentellen Tätigkeiten aufbaut, hat sich als tragfähig und höchst erfolgreich erwiesen (Euler 2010). Die primären Vorzüge gegenüber dem traditionellen Unterricht sieht Euler (2010) entsprechend u. a. in der Authentizität, der Orientierung an wissenschaftlichen und technischen Arbeitsweisen und der fachlichen Expertise durch Kontakt mit aktiven Wissenschaftlern. Auch Itzek-Greulich und Vollmer (2018) führen aus, dass *„der praktischen Arbeit im Schülerlabor eine höhere Authentizität zugesprochen wird als dem Schulunterricht“* (S. 321). Sie fassen zusammen, dass Schülerlabore den Eindruck eines realen wissenschaftlichen Umfelds primär durch die Nähe zu aktuellen Themen und durch ihre bessere Ausstattung vermitteln können. Außerdem würden die Lernenden in der Konsequenz auch ein höheres situationales Kompetenzerleben und situationales Interesse äußern. In den Arbeiten von Engeln (2004), Glowinski (2007) und Pawek (2009) findet sich beispielsweise dieser Zusammenhang zwischen der positiven Wirkung der Authentizität bzw. des authentischen Einblicks in die Forschung und dem aktuellen Interesse.

Unter Authentizität versteht man die Echtheit im Sinne der möglichst großen Annäherung an ein Original oder an die reale Welt. Das Ziel der Authentizität kann in Schülerlaboren auf verschiedenen Ebenen verwirklicht sein:

- durch den Einblick in das Umfeld einer Wissenschaftlerin / eines Wissenschaftlers;
- durch die direkte Begegnung mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern;
- durch die Arbeit mit forschungsidentischen Geräten und/oder Methoden, beziehungsweise durch forschungsnahes Experimentieren (vgl. Euler 2005; Scharfenberg 2005).

Engeln (2004) unterscheidet diese Ebenen bezogen auf die Lebenswelt der Lernenden (realitätsnahe, authentische Forschungssituationen) oder die Berufswelt (Kontakt zu Wissenschaftlern und Wissenschaft). Der Bezug zur Berufswelt ist allein durch die Verortung vieler Labore an einem Forschungsinstitut oder einer Universität und die häufige Betreuung durch Wissenschaftler unmittelbar präsent. Das Berufsbild im Bereich der Naturwissenschaften kann näher gebracht und eine berufliche Orientierung erleichtert werden. Durch die Begegnung mit Wissenschaftlern und Wissenschaft können die Schüler die Faszination, die Herausforderung und die Bedeutung von Forschung erleben und die abstrakte Vorstellung von Wissenschaft und wissenschaftlichem Arbeiten kann konkretisiert werden (Euler 2005). Für das authentische Experimentieren gilt das Ziel, ein realistisches Bild von den Aufgaben, Arbeitsweisen und Leistungen der Naturwissenschaften zu vermitteln (Ringelband et al. 2001). Die forschungsnahen Experimente unterscheiden sich von den häufig eng geführten Schulversuchen in ihrer problembezogenen Konzeption und ihrem authentischen Charakter (Euler 2005). Denn forschungähnliches Experimentieren ist in der Schule aus unterschiedlichsten Gründen häufig nicht durchführbar, da es weniger variabel gestaltet werden kann und die Ressourcen (Raum, Zeit, Geld und Expertise) limitiert sind (Chinn und Malhotra 2002; Hofstein und Lunetta 2004). Chinn und Malhotra (2002) sehen keine Möglichkeit, authentische Forschung in einer Schulstunde (45 Minuten) abzubilden. Jedoch besteht Einigkeit darüber, dass hinsichtlich praktischer Arbeit im naturwissenschaftlichen Kontext der Schule eine authentische Vermittlung Erfahrungen bieten könnte, die eher mit den Aktivitäten eines Wissenschaftlers in der tatsächlichen Forschungswelt übereinstimmen. Des Weiteren sollten diese Erfahrungen auch schülerzentrierte und ergebnisoffene Aufgaben beinhalten (Braund und Reiss 2006). Gerstenmaier und Mandl (1995) beschreiben, Authentizität sei gegeben, wenn eine Lernumgebung es dem Lernenden ermöglicht, „mit realistischen Problemen und authentischen Situationen umzugehen“ und „einen Rahmen und Anwendungskontext für das zu erwerbende Wissen bereit(stellt)“ (S. 879). Guderian und Priemer (2008) geben jedoch zu bedenken, dass es keine Definition für die Authentizität im Schülerlabor gibt und es fraglich ist, ob bereits das Tragen von Laborkitteln oder die Verwendung spezieller experimenteller Geräte ausreicht. Betz et al. (2016)

stellen in ihrer Arbeit ein Modell vor, mit dem das Konstrukt Authentizität genauer definiert werden soll (**Abbildung 3**), um diese Lücke zu schließen. Das Konstrukt wird hier in einem mehrdimensionalen Wirkungszusammenhang operationalisiert. Dem Modell entsprechend gehören zu einem authentischen Lernsetting das eingesetzte Material, der Lernort, die Vermittler (Betreuer), die Inhalte, die Methoden sowie die Innovation. Innovation meint in diesem Kontext offene Fragen oder Probleme aktueller Forschung, zu denen die Lernenden bedeutsam beitragen können. Zusammen mit individuellen Personenmerkmalen (z. B. Vorwissen, individuelles Interesse) wirken diese Merkmale des Lernsettings auf die Komponente „Authentisierung durch Interaktion“. Aus diesem Prozess resultiert die subjektive Authentizitätsempfindung. Diese kann motivationale und kognitive Effekte hervorrufen.

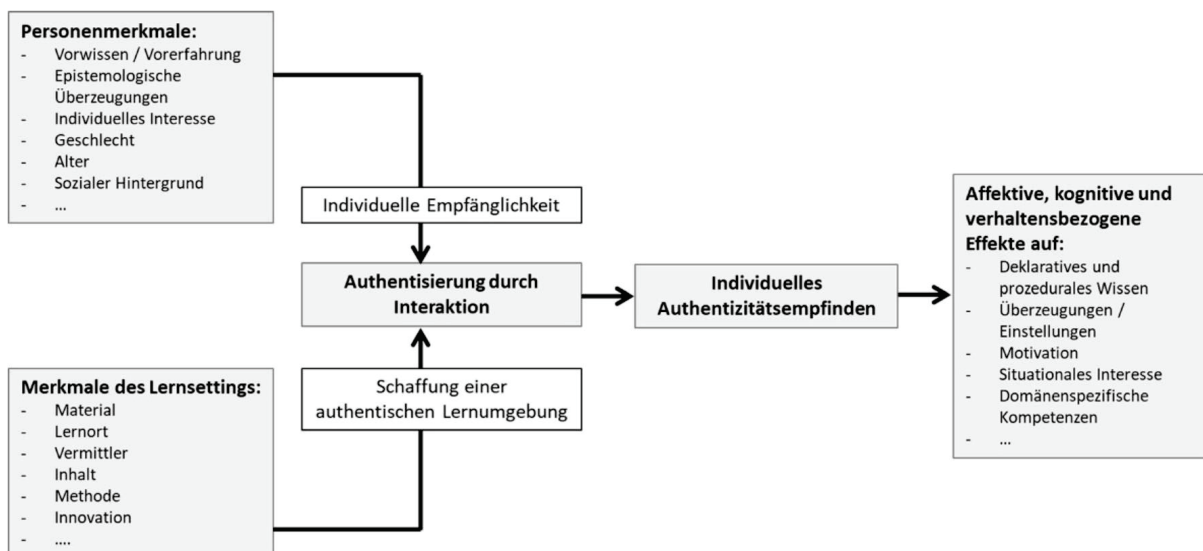


Abbildung 3: Deutschsprachige Version des Modells von Authentizität in Lehr-Lernkontexten
(aus Betz 2018, S. 264).

Itzek-Greulich und Vollmer (2018) führen dazu aus, dass das Promotionskolleg „Authentizität der Wissenschaftsvermittlung im Schülerlabor“ erste Hinweise darauf gefunden hat, dass authentische Lernsettings des Schülerlabors zu seiner Wirksamkeit beitragen und den Mehrwert des Schülerlabors ausmachen. Ihrer Meinung nach ist das eigentliche Ziel der Labore nicht ein Lernzuwachs, sondern u. a. eine Interessensgenese zum Forschen und das Initiieren wissenschaftlicher Karrieren; denn durch die Vermittlung eines realistischen Einblicks in die Wissenschaft kann es gelingen, geeigneten Nachwuchs für die jeweiligen Disziplinen zu gewinnen (Betz 2018). Dies scheint am ehesten in einer

möglichst authentischen Lernumgebung zu funktionieren. So konnten im Bereich der geisteswissenschaftlichen Schülerlabore signifikante Effekte auf die epistemologischen Überzeugungen und das situationale Interesse durch die Authentizitätswahrnehmung (Betz 2018) bzw. durch die authentischen Lernmaterialien (Mierwald et al. 2018) nachgewiesen werden. Weiterhin zeigt sich, dass die Schüler dem Lernort Schülerlabor eine höhere Authentizität zuschreiben als der Schule – bei gleichem Lernsetting (Betz 2018). Betz et al. (2016) beschreiben, dass Authentizität im Sinne eines Bildungskonstrukts häufig nur mit einer Simulation des professionellen Kontextes einhergeht, da Lernumgebungen zumeist didaktisch aufbereitet sind. Demnach ist sie als kontinuierliches Merkmal zu verstehen, sodass eine Lernumgebung nicht entweder authentisch oder nicht authentisch ist (vgl. Chinn und Malhotra 2002). Die Authentizität kommt dann nur schwach zum Tragen, wenn die Lernumgebung didaktisch stark aufbereitet ist oder stark zum Tragen, wenn die Merkmale des professionellen Kontextes in hohem Maße simuliert sind.

2 Neurobiologie im Bildungskontext

2.1 Verständnis- und Vermittlungsprobleme in der Neurobiologie

Die Neurowissenschaften werden in Forschungsarbeiten immer wieder als eines der schwierigsten Teilgebiete der Biologie sowohl für Schüler als auch für Studierende angeführt. Das Problem scheint dabei so alt und aktuell wie eh und je zu sein. Bereits 1974 beschreiben Manalis und Hastings, dass Studierende Probleme haben, die abstrakte Vorstellung von der Entstehung des Ruhemembranpotenzials über die Ionengradienten und Membranpermeabilität nachzuvollziehen. Auch Barry (1990) erklärt, dass Studierende der Naturwissenschaften kein angemessenes Verständnis von Membranpotenzialen erreichen. Hierzu finden sich Studien, die bei Studierenden signifikante Fehlvorstellungen im Bereich der Neurophysiologie aufzeigen – beispielsweise bezüglich des Membranpotenzials (Silverthorn 2002) oder der synaptischen Transmission (Montagna et al. 2010). Silverthorn (2002) beschreibt, dass das Ruhemembranpotenzial eines der schwierigsten Konzepte ist, das Studierende verstehen müssen. Um diesbezüglich Fehlvorstellungen ihrer Studierenden aufzudecken, entwickelte sie folgende Frage: „*What happens to the membrane potential of a cell when the extracellular potassium concentration goes from 3 to 5 mM? Explain*“ (Silverthorn 2002, S. 69). Nur 38 % beantworteten die Frage korrekt („*The membrane potential becomes more positive*“;

Silverthorn 2002, S. 69), wobei von ihnen nur 22 % in der Lage waren, eine schlüssige Begründung für ihre Antwort zu geben, i. d. R. aber ohne die Nernst-Gleichung anzuwenden. Silverthorn beschreibt auch, dass die Studierenden häufig keine Vorstellung von den Dimensionen der Ionenkonzentrationen oder vom Gleichgewichtspotenzial haben und nicht verstehen, was es bedeutet, wenn das Membranpotenzial sinkt oder steigt. So beschreiben 75 % fälschlicherweise, dass das Sinken des Membranpotenzials – was einer Depolarisation gleichzusetzen ist – bedeutet, dass das Potenzial negativer wird. Montagna et al. (2010) finden in ihrer Studie bedenkliche Fehlvorstellungen der Studierenden bezüglich der synaptischen Transmission. Sie erklären, dass unter anderem durch den Begriff „Transmission“ bei den Studierenden die Vorstellung vorherrscht, dass an der Synapse das Aktionspotenzial direkt auf das nächste Neuron übertragen wird. Dabei geht die Tatsache unter, dass in diesem Fall jegliche Möglichkeit zur Informationsverarbeitung verloren gehen würde und keine Modulation möglich wäre. Guy (2012) erklärt, dass Spannungs-Zeit-Graphen für den Verlauf von Membranpotenzialen schwierig zu verstehen sind, da die Studierenden häufig nicht mit oszillographischen bzw. computerbasierten Darstellungen von neuronalen Signalen vertraut sind. In seiner Studie fand er mehrere Fehlvorstellungen bei den Studierenden, welche den Neurophysiologie Kurs bereits abgeschlossen hatten:

- 1) Die Amplitude von synaptischen Potenzialen bleibt während der Ausbreitung unverändert (57 %);
- 2) das Aktionspotenzial wird direkt von einem Neuron auf das nächste übertragen (40%);
- 3) die Amplituden von Aktionspotenzialen und synaptischen Potenzialen liegen ähnlich (39%);
- 4) exzitatorische synaptische Potenziale überschreiten in der Regel 0mV (35 %);
- 5) nur manche Bereiche eines Neurons haben ein Ruhemembranpotenzial um -70mV (33 %) (Guy 2012, S. 226).

Slominski et al. (2017) untersuchten in ihrer Studie vor Beginn des eigentlichen neurophysiologischen Kurses das Ausgangswissen der Studierenden, um auf Grundlage der vorgeprägten Fehlvorstellungen die Lehre anzupassen und zu verbessern. Dazu ließen sie die Studierenden Zeichnungen von Nervenzellen, synaptischer Transmission und räumlicher Summation anfertigen. Nur 20 % der Studierenden erstellten anatomisch korrekte Zeichnungen der Nervenzellen mit zugehörigen Synapsen. Einer der häufigsten Fehler lag in einer gezeichneten direkten Verbindung von mehreren Nervenzellen. Die Summationsdarstellung wurde von nur 4 % der Teilnehmer richtig dargestellt. Die Studie zeigt auf, dass die Studierenden häufig inkorrektes vorgeprägtes Wissen mitbringen, was die Vermittlung der korrekten Wissensinhalte zusätzlich erschweren kann, wenn die Fehlvorstellungen nicht berücksichtigt und adäquat korrigiert werden.

Griff (2018) sieht die Probleme in folgenden Punkten:

- 1) Den Studierenden fehlt ein grundlegendes Verständnis der physikalischen und chemischen Prinzipien, die zum Verständnis von neurophysiologischen Konzepten erforderlich sind;
- 2) die Studierenden besitzen über das Nervensystem weniger Kenntnisse als über andere Organsysteme;
- 3) das mangelnde Verständnis könnte auf die häufige Schwerpunktsetzung der Physiologie auf die Themenfelder Verdauung, Atmung und Herz-Kreislaufsystem zurückzuführen sein (S 1f).

Krontiris-Litowitz (2003) sieht die Probleme darin, dass Studierende oft den Fehler machen, die Fakten auswendig zu lernen, ohne die zugrunde liegenden Konzepte zu verstehen. Daher können sie z. B. die molekulare Struktur eines Kanals gut beschreiben, aber keinen Kanal mit bestimmten Eigenschaften selbst konstruieren. Ähnliche Probleme treten bezüglich der Eigenschaften der Membran auf. In ihrer Studie fand sie zwei häufige Fehlvorstellungen:

- 1) Die Position der Transmitter-gesteuerten Kanäle platzierten die Studierenden in der Präsynapse;
- 2) die Studierenden haben die Vorstellung, dass Kanäle immer gesteuert sind (S. 115).

Cardozo (2016) erklärt, dass nach seiner Erfahrung ein logisches und intuitives Verständnis davon, wie ein Ionengradient eine elektrische Potenzialdifferenz über biologische Membranen erzeugen kann, für Schüler bis hin zu Studierenden schwer zu erreichen ist und dieses Konzept mehrheitlich nicht verstanden wird. Dieses Problem scheint seiner Meinung nach weit verbreitet zu sein. Diesbezüglich wurde auch der Begriff der „*Neuroscience anxiety*“ geprägt, der die Angst der Lernenden vor Themen oder Kursen zur Neurowissenschaft kennzeichnet, die wiederum Auswirkungen auf Kurs- und Studienwahl haben kann (Birkett und Shelton 2011).

MacNabb et al. (2006) beschreiben die Problematik der Neurovermittlung sehr ausführlich aus Sicht der Lehrer für den Schulkontext. Sie gehen darauf ein, wie schwierig es für Lehrkräfte ist, praxisbezogene Unterrichtseinheiten zur Neurobiologie umzusetzen und auch, dass die eigene Unsicherheit der Lehrkräfte bei dieser Thematik ein Grund dafür ist, dass sie eine tiefergehende Betrachtung der neurowissenschaftlichen Inhalte im Unterricht entsprechend scheuen. Viele Lehrkräfte gehen davon aus, dass das Thema für sie und für ihre Schüler zu schwierig ist. Die Autoren machten aber weiter die Erfahrung, dass auch bei den Lehrkräften tatsächlich Missverständnisse über grundlegende Konzepte bestehen. Die OECD beschreibt 2002 Neuromythen („*neuromyths*“), welche weit verbreitete Fehlvorstellungen zu neurobiologischen Inhalten beschreiben, die durch Fehldeutungen oder Fehlzitierung von wissenschaftlichen Fakten entstehen. Deligiannidi und Howard-Jones (2015)

zeigen auf, dass diese Mythen auch die Praxis von Lehrkräften beeinflussen und international verbreitet sind. Ein forschungsbasierter Ansatz ist i. d. R. auf dem Feld der Neurobiologie im Schulkontext nicht zu finden. Die meisten Kursmaterialien, die den Lehrkräften zur Verfügung stehen, bestehen aus Lehrbüchern, welche oft gekürzte und inakkurat vereinfachte neurowissenschaftliche Darstellungen enthalten. Im Unterricht ist die Behandlung des Gehirns in der Mittelstufe meist auf die Sinneswahrnehmung beschränkt. Über weitergehende mögliche Ressourcen für Lehrmaterial sind Lehrkräfte oft nicht informiert oder es benötigt zu viel Arbeit und Wissen, um sie unterrichtsspezifisch vorzubereiten.

Bereits Barry (1990) sieht die Ursachen für die Problematik des Verständnisses bei den Lernenden zum Teil darin begründet, dass sie keine praktischen Erfahrungen mit der Entstehung und Messung von elektrischen Potenzialen haben. Albarracín et al. (2016) erklären, dass die größte Herausforderung für die Laborarbeit darin besteht, abstrakte Konzepte in einfachen, praktischen Übungen anzuwenden. Studierende hätten aber nur selten die Möglichkeit, an einem Labor teilzunehmen, das praktisches Lernen mit einem realistischen Versuchsaufbau kombiniert. Dagda et al. (2013) führen aus, dass die Lehrenden häufig vor dem Problem stehen, die Prinzipien der Neurophysiologie mit nur begrenzt verfügbaren Ressourcen unterrichten zu können. Für viele experimentelle Labordurchführungen müssen die Lehrenden über hochqualifizierte Kenntnisse in elektrophysiologischen Techniken verfügen. Durch den daraus resultierenden Mangel an praktischen Laborversuchen haben in der Folge viele Lernende Schwierigkeiten, die neurophysiologischen Konzepte zu verstehen. So seien die Vermittlung und das Verstehen dieser Konzepte sowohl für die Dozenten als auch für die Studierenden einschüchternd. Marzullo und Gage (2012) beziehen sich in ihrer Ausführung auf den Schulkontext und legen dar, dass die mangelnde neurowissenschaftliche Bildung in der Schule auch hier u. a. in einem Mangel an einfachen, überzeugenden und kostengünstigen Werkzeugen begründet liegt, mit denen elektrophysiologische Messungen durchgeführt werden könnten. Neben dem Kostenfaktor wäre weiterhin zu berücksichtigen, dass auch umfassende Schulungen für die Benutzung der Versuchs-Setups nötig würden und im Schulkontext die zulässigen Experimente stark eingeschränkt sind (z. B. keine *in-vivo* Experimente mit Wirbeltieren).

2.2 Vermittlungsansätze der Neurobiologie

Es gibt vielfältige didaktische Vermittlungsansätze, die versuchen, den beschriebenen Schwierigkeiten entgegenzutreten (**Tabelle 2**). Dabei sollen zum einen Verständnisschwierigkeiten und Fehlvorstellungen ausgeräumt und zum anderen praktische Zugänge für die Neurobiologie geschaffen werden. Einige der praktischen Ansätze legen besonderen Wert auf eine authentische Vermittlung

der wissenschaftlichen Forschungsarbeit, um Fehlvorstellungen zu korrigieren. Die innovativen Ansätze reichen von Erklärungsmodellen über interaktive Präparationsansätze und Analogien bis hin zu computerbasierten Simulationen oder virtuellen Ansätzen. Die computerbasierten Ansätze werden aufgrund ihres thematischen Bezugs zu der vorliegenden Arbeit in Kapitel 2.3 im Detail betrachtet.

Tabelle 2: Vermittlungsansätze der Neurobiologie.

Methoden	Vermittlungsansatz	Beispielliteratur
Rollenspiele	Visualisierung mit interaktiver Komponente.	Carvalho 2011 Holloway 2013
Erklärungsmodelle	Verständnisschwierigkeiten der grundlegenden Konzepte beseitigen.	Cardozo 2016 Wright 2004
Analogien	Visualisierung und Greifbarkeit von ansonsten nicht sichtbaren Prozessen.	Griff 2018 Milanick 2009 Sircar 1994
Funktionsmodelle	Vereinfachte Nachbildungen von Nervenzellen, an denen bioelektrische Potenziale ohne aufwändige, kostenintensive und technisch anspruchsvolle Aufbauten nachvollzogen werden können.	Dabrowski et al. 2013 Shlyonsky 2013
Strukturmodelle	Veranschaulichung der neurobiologischen Struktur und interaktive Auseinandersetzung durch Selbstmodellierung der Modelle.	Keen-Rhinehart et al. 2009 Krontiris-Litowitz 2003
Praxis	Vermeidung der häufig rein theoretisch vermittelnden Ansätze durch Umsetzung von interaktiven Ansätzen.	Deal et al. 2014 Landa-Jiménez et al. 2016
Präparationen	Authentische Vermittlung der neurowissenschaftlichen Forschungsmethoden.	Dagda et al. 2013 Johnson et al. 2002 Schwab et al. 1995 Shannon et al. 2014 Yoshida 2001

Eine Vermittlung außerhalb einer Laborumgebung kann beispielsweise auf der Ebene von Erklärungsmodellen stattfinden, über Analogien oder über Demonstrationen durch Rollenspiele. Holloway (2013) beschreibt beispielsweise eine überarbeitete interaktive Darstellung, in der die Studierenden selbst drei Neurone und die Erregungsbildung, Übertragung und Weiterleitung

nachstellen. Carvalho (2011) erläutert ebenfalls ein interaktives Rollenspiel, in dem die Lernenden die Ionenbewegungen während eines Aktionspotenzials nachspielen, indem sie bunte Ballons halten.

Die vielfältigen Verständnisprobleme von Studierenden oder Schülern aufgreifend präsentiert eine Reihe von Arbeiten alternative Erklärungswege und -modelle. Wright (2004) bietet eine gut ausgearbeitete Analyse der Nernst-Gleichung, in der er detailliert beschreibt, wie die Gleichung entwickelt wurde. Er führt den Leser dadurch zu einem tiefen Verständnis des Prozesses zur Entstehung eines Ruhepotenzials bis auf die Ebene der tatsächlichen Anzahl involvierter Ionen. Kurbel (2003) setzt auf eine vereinfachte Erklärung für die Entstehung eines Aktionspotenzials, um im Besonderen auf die Aktionspotenziale beim Herzen einzugehen. In Eyers (2003) Erklärungsansatz findet sich eine problembasierte Komponente, die eine kognitiv aktive Auseinandersetzung der Lernenden fördert und so die Prinzipien der Nernst- und Goldman-Gleichung sowie die damit verbundenen Grundlagen für das Ruhe- und Aktionspotenzial vermittelt. Giuliadori und Zuccolilli (2004) stellen in ihrem Artikel ein Erklärungsmodell dar, in welchem sie besonderen Wert darauf legen, zwischen postsynaptischen Potenzialen (Liganden-gesteuerte Kanäle) und Aktionspotenzialen (spannungsgesteuerte Kanäle) bezüglich ihrer Entstehung und Charakteristik (Amplitude, Dauer...) zu differenzieren. In anderen Konzepten werden Fach verwandte Prinzipien implementiert, indem beispielsweise besonderer Fokus auf die an der Membran entstehenden elektrischen Felder gelegt wird (Rodriguez-Falces 2013, 2015) oder indem anhand von technischen Prinzipien die Potenzialentstehung Schritt für Schritt aufgebaut wird (Cardozo 2016).

Auch der Einsatz von Analogien soll den Lernenden außerhalb des Labors die schwer zu greifenden Prinzipien der Neurophysiologie näher bringen und in für sie nachvollziehbare Konzepte einbetten, wobei die eigentlich nicht sichtbaren neurophysiologischen Prozesse in der Regel visualisiert werden. Procopio (1994) und Sircar (1994) arbeiten mit hydraulischen Analogien bei der Vermittlung von bioelektrischen Potenzialen. In Procopios (1994) Analogie wird die Membrankapazität über einen Wasserbehälter dargestellt, das Membranpotenzial wird über die wechselnde Höhe der Wasseroberfläche veranschaulicht und die Leitfähigkeit über Ventile zu anderen Wasserbehältern. Sircar (1994) implementiert in dieses Modell den Luftdruck, sodass die Membrankapazität über das Luftvolumen in U-förmigen Röhrensystemen dargestellt wird, das Membranpotenzial über die Druckdifferenz, die Ionenkonzentration über die Druckhöhe der Flüssigkeit und die Natrium-Kalium-Pumpe über eine Injektionspumpe. Milanick (2009) arbeitet auch mit Flüssigkeiten, entwickelte aber eine Analogie, in der die Visualisierung des Membranpotenzials auf deren Farbveränderungen beruht. Dazu stellen unterschiedlich gefärbte Lösungen unterschiedliche Ionentypen dar, die Farbintensität die Konzentration, Ventile die Leitfähigkeit und die gemischten Lösungen ergeben das entsprechende

Membranpotenzial. In anderen Analogieansätzen wird das Membranpotenzial durch Sprungfedern visualisiert (Cardozo 2005). Dazu wird die Gleichung, welche die Beziehung zwischen Membranpotenzial, Ionen-Gleichgewichtspotenzial und Ionen-Leitfähigkeit beschreibt, der Gleichung des Hookeschen Gesetzes gegenübergestellt. Zur Visualisierung der Reizweiterleitung existiert die bekannte Analogie der „*Traveling Flame*“, die von Sircar und Tandon (1996) präzisiert wurde und auch die saltatorische Reizweiterleitung mit aufgreift. Auch zur Informationsverarbeitung an den Synapsen existieren Analogien, in denen die Summationen von postsynaptischen Potenzialen betrachtet werden, beispielsweise mit Kerzen, die eine Bratpfanne erhitzen (Griff 2006) oder mit Wasserbechern, die für postsynaptische Potenziale stehen und in einem größeren Becher aufsummiert werden müssen (Griff 2018).

Näher am Original bleiben Funktionsmodelle, in denen die bioelektrischen Mechanismen der Nervenzellen nachgebildet werden. Die Umsetzung von Modellzellen zur Analyse und Auswertung von Membranpotenzialen werden in vielen Arbeiten beschrieben. Die Umsetzung, in der eine künstliche Membran zur Hilfe genommen wird, um Ionenselektivitäten nachzustellen, ist relativ alt (Manalis und Hastings 1974) und wurde im Verlauf der Jahre immer wieder aufgegriffen und moduliert, wobei die eingesetzte künstliche Membran häufig angepasst wurde (Moran et al. 1999). Shlyonsky (2013) stellt eine künstliche Membran vor, die aus einem Polycarbonatfilter besteht und deren Ionenselektivität durch Einbringung von unterschiedlichen Ionophoren individuell angepasst werden kann. Durch die Modellzellen können alle Faktoren, die zur Entwicklung von Diffusionspotenzialen führen, erarbeitet werden. Ein davon abweichendes Funktionsmodell wird in der Arbeit von Dabrowski et al. (2013) beschrieben. Dort wird ein zum Neuron äquivalenter Schaltkreis konstruiert, in dem zum Beispiel ein Kondensator die Membran und ihre Leitfähigkeit darstellt und Kapazität und Widerstand thematisiert werden können.

Im Bereich der eher strukturellen Modelle zeigen Keen-Rhinehart et al. (2009) und Krontiris-Litowitz (2003) Unterrichtskonzepte, die darauf beruhen, dass die Modelle von den Lernenden selbst modelliert werden. Krontiris-Litowitz (2003) arbeitet diesbezüglich mit Knete und Perlen und lässt die Lernenden sowohl Ionenkanäle als auch komplette Nervenzellen bauen. Keen-Rhinehart et al. (2009) verwenden in ihrem Trainingsprogramm für Postdoktoranden zwei interaktive Unterrichtsmaterialien zur Vermittlung des Aktionspotenzials. Der erste Modellansatz greift auf alltägliche Materialien wie Trockenbohnen und Zahnstocher zurück, mit denen die Postdoktoranden Nervenzellen und den Ionenfluss während eines Aktionspotenzials nachbauen. Der zweite Unterrichtsentwurf arbeitet mit einer Tischunterlage mit aufgemalter neuronaler Zellmembran, auf der die

Lernenden mit ausgeschnittenen Komponenten z. B. die Membrankanäle, Ionen und die Natrium-Kalium-Pumpe anordnen können.

Die praktischen Ansätze legen besonderen Wert darauf, die oft rein theoretische Vermittlung der neurobiologischen Inhalte durch diese neuen Akzente zu verändern. Deal et al. (2014) entwickelten dazu ein Bildungsprogramm für Schüler und Lehramtsstudierende, in denen die neurobiologischen Unterrichtskonzepte für verschiedene Altersstufen auf interaktiven Ansätzen beruhen und beispielsweise die Themenfelder Neuroanatomie, Drogenmissbrauch und neurologische Störungen umfassen. Landa-Jiménez et al. (2016) arbeiten mit einem Muskel-Computer-Interface als didaktischem Tool, um elektrophysiologische Konzepte besser verständlich zu machen. Für die Steuerung eines LEGO Roboters benutzt das Interface elektromyografische Signale. Mit dem Tool können elektrische Muskelaktivitäten erklärt, die Stärke zwischen unterschiedlichen Muskeln verglichen und der Prozess der Muskelermüdung beobachtet werden.

Vermittlungsansätze, die mit Präparationen arbeiten, legen besonderen Wert auf eine authentische Vermittlung der neurowissenschaftlichen Forschungsmethoden und bieten einen direkten Zugang zu elektrophysiologischen Experimenten. Dabei kommen extra- und intrazelluläre Messungen zum Einsatz. Für extrazelluläre Messungen werden häufig Invertebraten ausgewählt. Es finden sich beispielsweise Ansätze, in denen die unterschiedlichen sensorischen Systeme (Beine, ventrale Nervenstränge, Antennen, Cerci-Ganglien) von Insekten (Schaben, Grillen, Kakerlaken) gemessen werden (u. a. Dagda et al. 2013; Marzullo und Gage 2012; Ramos et al. 2007). In diesen Versuchen werden unter anderem sensorische Stimulationen, Elektrostimulationen oder pharmakologische Manipulationen vorgenommen. Damit können beispielsweise die Konzepte der sensorischen Antwort, Frequenzkodierung und spannungsabhängige Ionenkanäle vermittelt werden. Kladt et al. (2010) und Shannon et al. (2014) arbeiten mit Regenwürmern und betrachten dabei im Speziellen die Reizweiterleitung. Für intrazelluläre Messungen setzen Schwab et al. (1995) Eier der Krallenfrösche ein und messen die Antwort auf schrittweise Veränderungen der extrazellulären Kaliumkonzentration. Viele andere Ansätze arbeiten mit Muskelzellen bzw. Herzmuskelzellen (Guenec et al. 2002; Thurman 1995; Yoshida 2001). Auch bei diesen Ansätzen kann mit Veränderungen der extrazellulären Umgebung gearbeitet werden, indem die Konzentrationen verändert oder Kanalblocker eingebracht werden. Yoshida (2001) beschreibt in seinem Ansatz die Verwendung von Polyethylen-Schläuchen, um die leicht zerbrechlichen Mikroelektroden aus Glas zu ersetzen. Ribeiro-Filho et al. (2012) stellen eine Präparation der glatten Muskulatur der Eingeweidearterie einer Ratte vor, bei der die Kontraktion der Muskulatur als Indikator der wechselnden Membranpotenziale als Antwort

auf wechselnde Ionengradienten gemessen wird und vermeiden auf diese Weise ebenfalls die technisch schwierige Methodik mit Glas-Mikroelektroden. Des Weiteren gibt es auch intrazelluläre Messansätze mit Pflanzen. Johnson et al. (2002) setzen beispielsweise die Armleuchteralge ein, die aufgrund ihrer großen Zellen ebenfalls die technischen Abläufe bei den Messungen vereinfachen. Die Algen generieren Aktionspotenziale als Antwort auf mechanische Stimulation, Verletzungen oder direkte elektrische Stimulation. Durch das abweichende Membranpotenzial und die großen Aktionspotenzial-Amplituden lernen die Studierenden außerdem die Vielfalt der Potenzial-Charakteristika kennen.

2.3 Computerbasierte Lernumgebungen

Eine weitere Möglichkeit der Vermittlung von naturwissenschaftlichen Inhalten bieten computerbasierte Ansätze. Chinn und Malhotra (2002) führen in ihrer theoretischen Abhandlung über authentische Forschung in der Schule das computergestützte Experimentieren als einen von fünf möglichen Ansätzen auf und erklären, dass dieser Eigenschaften von authentischer Forschung aufweisen kann (vgl. Kapitel 5.3.7). Bereits Hodson (1998) beschreibt bezüglich seiner drei Labor-Lernziele (*learning science*, *learning about science* und *doing science*), dass diese unter bestimmten Bedingungen ähnlich gut oder besser durch andere Methoden als das selbstständige Experimentieren der Schüler erreicht werden und führt u. a. computerbasiertes Lernen an.

Ma und Nickerson (2006) definieren in ihrem Review die Unterschiede zwischen Hands-on (Nasslabore/physische Labore), Remote und simulierten (virtuelle/trockene Labore) Laboren. Hands-on Labore beschreiben einen realen Forschungsprozess. Dabei sind das komplette benötigte Material und die Lernenden physisch vor Ort. Unter Remote-Laboren verstehen sie eine Vermittlung der Realität, wobei das Experiment und der Experimentator nicht am selben Ort sind. Der Experimentator kontrolliert also das Experiment aus der Ferne. Simulierte Labore werden als Imitation von realen Experimenten beschrieben. Dabei sind in der Regel alle notwendigen Ressourcen auf Computern simuliert. Jong et al. (2013) beschreiben in ihrem Review, dass beide Ansätze (physische und virtuelle Labore) ähnliche Ziele erreichen können, wie zum Beispiel die Erforschung der Natur der Wissenschaft, die Entwicklung der Teamfähigkeit, die Förderung des wissenschaftlichen Interesses, die Förderung des konzeptuellen Verständnisses und die Entwicklung von Forschungskompetenzen. Gleichzeitig haben sie aber auch ihre spezifischen Vor- und Nachteile.

Remote-Labore haben das Potenzial, reale Experimente erschwinglicher zu machen, da die experimentellen Aufbauten mit mehreren Einrichtungen geteilt werden können. Durch die Flexibilität können viele Lernende häufiger an unterschiedlichsten Orten die Experimente durchführen. In einigen Studien zeigt sich die Akzeptanz der Remote-Labore, die Gleichwertigkeit mit einem realen Labor ist aber limitiert. Außerdem ergibt sich aus den Studien, dass Lernende die Remote-Labore nicht als realistisch betrachten und dass sie ihnen gegenüber ähnlich empfinden wie gegenüber simulierten Laboren, obwohl reale Daten gemessen werden (Ma und Nickerson 2006). Für die vorliegende Arbeit ist eine nähere Betrachtung der Remote-Labore nicht relevant.

Bei der realen Laborarbeit (Nasslabore) können die Lernenden experimentelle Laborkenntnisse erwerben, einschließlich methodischer Kenntnisse zur Fehlerbehebung. Gleichzeitig müssen sie sich den Herausforderungen stellen, mit denen viele Wissenschaftler bei der Planung von Experimenten konfrontiert sind, da eine sorgfältige Einrichtung der Geräte und eine genaue Beobachtung über einen langen Zeitraum erforderlich ist. Die Lernenden erfahren durch die Auseinandersetzung mit realen Daten die Komplexität der Wissenschaft und müssen sich mit unerwarteten Ereignissen wie etwa Messfehlern auseinandersetzen. Auf diese Weise erleben die Lernenden sehr deutlich den Unterschied zwischen Theorie und Praxis, was in Simulationen fehle. Allerdings generieren Experimente in Nasslaboren nur wenige Daten für eine Analyse, von denen viele verrauscht, schwierig auszuwerten und einzuordnen sind (Grisham 2009). Crisp (2012) schlussfolgert, dass die Erfahrungen in diesen Laboren sich eher aus dem Handlungsprozess ergeben und somit das Denken und Handeln in der Physiologie betonen. Weniger im Fokus stehen hierbei disziplinarisches Wissen und die Beherrschung der Inhalte. Damit verbunden ist der Vorteil der taktilen Informationen, die nach der Theorie der mentalen Repräsentation die Entwicklung von konzeptuellem Wissen fördern (u. a. Jong et al. 2013; Ma und Nickerson 2006). Ma und Nickerson (2006) weisen aber auch darauf hin, dass Hands-on Labore mit vielen notwendigen Ressourcen verbunden sind (Zeit, Kosten, Raum, Infrastruktur).

Wenn die Experimente außerhalb dieser Ressourcenverfügbarkeit liegen, stellen computerbasierte Umsetzungen eine gute Alternative dar, was von vielen Autoren als eines der Hauptargumente angeführt wird (u. a. Chinn und Malhotra 2002; Hofstein und Lunetta 2004). Schettino (2014) legt dar, dass aufwändige Experimente in kleinen Bildungseinrichtungen während der vorgesehenen Vorlesungszeit selten durchführbar sind. Aber auch grundsätzlich ist es in der Biologie bei manchen Experimenten schwierig, sie innerhalb des zeitlichen Rahmens der Laborübungen durchzuführen, sodass den Lernenden ohne virtuelle Labore der Zugang zu diesen Experimenten gar nicht möglich wäre (Lewis 2014). Die Demonstration von realen Labortechniken der Neurobiologie dauert mehrere

Stunden und erst nach etwa 2 bis 3 Wochen ist ein Studierender in der Form qualifiziert, dass er die Techniken selbstständig durchführen kann (Diwakar et al. 2016). Die zeitliche Effizienz (weniger Vorbereitung, schnellere Ergebnisgenerierung von langwierigen Experimenten) bietet den Lernenden außerdem die Möglichkeit, eine größere Anzahl an Experimenten durchzuführen. Auf diese Weise werden mehr Informationen gesammelt als in der gleichen Zeit mit der Durchführung des physischen Experiments hätten erbracht werden können (Lewis 2014). Nicht zu vernachlässigen ist der finanzielle Aspekt – die Durchführung virtueller Labore ist kostengünstiger. Da die Ausrüstung (meist) ausschließlich aus Computern besteht, sind weder ein spezieller physischer Raum noch eine spezielle Ausrüstung erforderlich (Grisham 2009). Diwakar et al. (2014) führen beispielsweise aus, dass die Kosten für eine Patch-Clamp Einrichtung bei rund 60.000 US Dollar liegen können und hierbei nur die Grundausstattung, nicht aber die Folgekosten kalkuliert sind. Virtuelle Labore ermöglichen dagegen auch langfristig erhebliche Kosteneinsparungen, nachdem die anfänglichen Entwicklungs- oder Anschaffungskosten gedeckt sind, da sie in der Regel keine fortlaufenden Kosten durch Verbrauchsmaterialien verursachen (Lewis 2014). Kaisarevic et al. (2017) ergänzen einen weiteren positiven Aspekt – die bessere Möglichkeit in der Organisation von immer größer werdenden Kursen. Mit virtuellen Ansätzen können die Experimente parallel in Kleingruppen durchgeführt werden, sodass alle Lernenden aktiv eingebunden sein können (vgl. Grisham 2009). Andernfalls ist häufig nur eine Experimentierstation verfügbar (u. a. Chinn und Malhotra 2002). Diese Vorteile machen digitale Labore in nahezu jeder Institution möglich, insbesondere in solchen, die nicht über die benötigten Ressourcen verfügen, um herkömmliche Nasslabor-Experimente anbieten zu können (Grisham 2009; Lewis 2014). Neben der Ressourcenproblematik für reale Experimente sind in den letzten Jahren außerdem eine wachsende Sorge um das Wohlergehen von Tieren und die damit verbundenen ethischen Konflikte in den Fokus gerückt (u. a. Dewhurst 2006; Kaisarevic et al. 2017; Knight 2007). Eine sorgfältige Sicht auf alternative Lehrmethoden ist gewünscht (Rochelle et al. 2016). Lewis (2014) führt aus, dass die virtuellen Labore das Potenzial haben, die ethischen Probleme und die rechtlichen Einschränkungen bezüglich der Verwendung von tierischen Präparaten zu überwinden. Außerdem stellt die Präparation der Tiere neben einer methodischen Schwierigkeit auch eine Belastung für viele Lernende dar und der Ersatz der realen Präparate kann diese Angst beseitigen. Durch das Umgehen der Präparation können sich die Lernenden auf die primären Lernergebnisse konzentrieren. Der Fokus in der naturwissenschaftlichen Bildung verändert sich demzufolge dahingehend, dass nicht vorrangig die experimentellen Fertigkeiten geschult werden, sondern ein Verständnis für die physiologischen Prozesse und Inhalte im Vordergrund steht.

Über die Problematik der Ressourcen hinaus erfordert die reale Laborarbeit gerade in der Biologie bzw. in der Neurobiologie auch fortgeschrittene methodische und konzeptionelle Fähigkeiten

(Schettino 2014). Die klassischen Experimente der Elektrophysiologie (Patch-Clamp, Current-Clamp und Voltage-Clamp) erfordern einen erheblichen Aufwand und sind technisch extrem anspruchsvoll (Diwakar et al. 2014; Lewis 2014). Die Ausbildung der Studierenden im Bereich der neurophysiologischen Experimente erfordert umfangreiches Wissen und geschulte Laborausbilder (Diwakar et al. 2016). Hier können die virtuellen Labore Unterrichtsmodule ermöglichen, die im Rahmen von Lehrlaboren absolut nicht praktikabel wären (Grisham 2009). Durch die Beseitigung der technischen und methodischen Schwierigkeiten der realen Experimente erhalten die Lernenden verlässliche Ergebnisse, mit denen sie arbeiten können. Eine stabile intrazelluläre Aufnahme von Aktionspotenzialen zu erhalten, ist alles andere als einfach (u. a. Davis 2001; Guennec et al. 2002; Yoshida 2001). Da die Lernenden technische oder experimentelle Fähigkeiten nicht beherrschen müssen, bevor sie aussagekräftige wissenschaftliche Daten erfassen können, können sie sich mit virtuellen Laborumsetzungen auf die zugrunde liegenden wissenschaftlichen Konzepte konzentrieren (Lewis 2014).

Computerbasierte Experimente weisen zudem auch methodische Vorteile auf, die erst durch den virtuellen Ansatz realisiert werden können. Die Lernenden werden bei der Arbeit mit virtuellen Laboren nicht durch Gerätefehler oder unerwartete Folgen abgelenkt bzw. frustriert (Braun 2003). Die Option der Programmierung ermöglicht weiterhin, das Experimentiersetting anzupassen, indem wichtige Informationen hervorgehoben, verwirrende entfernt oder Parameter angepasst werden, sodass das Lernen mit der virtuellen Umsetzung erleichtert werden kann (Jong et al. 2013). Auch die Möglichkeit, die Simulation zu stoppen und den Prozess zu überprüfen, kann helfen, ihn besser zu verstehen (Ma und Nickerson 2006). Die Lernenden können die Experimente in ihrer individuellen Lerngeschwindigkeit durchführen (Lewis 2014). Bei Bedarf könnten andererseits auch Messfehler oder methodische Schwachstellen in eine virtuelle Umgebung implementiert werden (Chinn und Malhotra 2002). Experimentelle Manipulationen wie das Variieren einiger Parameter (beispielsweise Hinzufügen, Entfernen und Ändern von Leitfähigkeit, Kapazität und Ionenkanälen) oder die Untersuchung des Zusammenspiels der biophysikalischen und dynamischen Eigenschaften von Neuronen und ihrer synaptischen Konnektivität sind in realen Experimenten nicht immer möglich (Av-Ron et al. 2008; Lewis 2014; Meuth et al. 2005). Abschließend ist anzumerken, dass Simulationen den Lernenden außerdem einen Zugang zu Experimenten von im Allgemeinen nicht beobachtbaren Phänomenen verschaffen können, wie beispielsweise aus dem Bereich der chemischen Reaktionen, der Thermodynamik oder der Elektrizität (Jong et al. 2013).

Simulationsumsetzungen weisen aber auch Limitationen auf, die betrachtet werden müssen. Bei der Gegenüberstellung von Simulationen und realen Experimenten ist eines der Hauptargumente gegen die Verwendung von Simulationen die geringe Praxiskomponente. Es wird damit argumentiert, dass

Lernende die Aufbereitung von Präparaten oder die Verwendung bestimmter Tools nicht mit Mausclicks üben können und dass somit wichtige praktische oder technische Fähigkeiten nicht erlernt werden (Braun 2003; Lewis 2014). Nach Braun (2003) wird dies auch mit der besten Computersimulation nicht erreicht, wobei in diesem Zusammenhang die Frage gestellt werden muss, in welchem Umfang – im konkreten Kontext der Schule - diese Fähigkeiten überhaupt erlernt werden müssen. Chinn und Malhotra (2002) sehen beim Einsatz von Simulationen als Hauptproblem die künstliche Säuberung der „Unordnung“ der naturgemäßen Welt. Dies führt dazu, dass die Lernenden keine Möglichkeit haben, mit untypischen, schlechten oder „falschen“ Daten umzugehen und daraus Lernerfahrungen zu generieren. Auch mangelt es den generierten Daten an biologischer Variation und Heterogenität. Die Tatsache, dass die Simulationen immer funktionieren, erwecke den Eindruck, dass dies in der „echten“ wissenschaftlichen Forschung ebenfalls immer der Fall ist (Lewis 2014). Richardson (2011) führt dazu aus, dass dies zu reduktionistischem Denken führen kann und infolgedessen zu Fehlvorstellungen. Außerdem können die Lernenden sich nur im Rahmen der Simulation bewegen und daher keine zusätzlichen Theorien aufstellen oder Variablen prüfen. Die Variablen sind vorgegeben und schließen damit eine Selbstständigkeit zur Variablenfindung sowie eine Eigeninitiative zur Überprüfung von weiteren Variablen aus. Die Autoren geben zu bedenken, dass die Lernenden bei diesem Konzept nicht lernen, eigenständig Variablen auszuwählen und zu kontrollieren (Chinn und Malhotra 2002). Lewis (2014) zeigt in seinem Review bezüglich der Biologie, dass überraschenderweise mehr als zwei Drittel der Studierenden traditionelle Nasslabore bevorzugen. Sie betrachten diese als realistischer und sehen hier eher die Möglichkeit, technische Fähigkeiten zu entwickeln, praktische Erfahrungen zu sammeln und Zusammenhänge zu erkennen. Sie empfinden jedoch auch die parallele Nutzung beider Ansätze als wünschenswert.

Die Durchsicht der einschlägigen Literatur ergibt, dass Computersimulationen ein wirksames Mittel sind, um Lernende mit den grundlegenden Konzepten der Neurophysiologie vertraut zu machen (u. a. Bish und Schleidt 2008; Stuart 2009). Einige Studien zeigen, dass es bezüglich der Lerneffizienz keinen Unterschied zwischen den Laborformen in der Lehre der Naturwissenschaften gibt und dass die Lernergebnisse der virtuellen Ansätze im Vergleich zu traditionellen Laboren gleich oder besser sind (u. a. Brinson 2015; Dewhurst 2006; Knight 2007; Sheorey et al. 2011). Beispielsweise generieren virtuelle Labore konzeptionelles Wissen auf vergleichbarem Niveau, wonach taktile Informationen offenbar keine Voraussetzung für die Entwicklung von konzeptionellen Kenntnissen oder Forschungsfertigkeiten zu sein scheinen (Jong et al. 2013; Kaisarevic et al. 2017). Es kommt demnach darauf an, welches Ziel mit der jeweiligen Laborumgebung erreicht werden soll, da beide Umgebungen andere pädagogische Erfahrungen bieten. Hofstein und Lunetta (2004) betonen, dass ethische Diskussionen sowie Ressourcen-Abwägungen zwar wichtige Elemente bezüglich der Entscheidung sind, wann

Lernende mit Simulationen arbeiten sollten, dass sie aber prinzipiell auf der Grundlage der gewünschten Lernergebnisse getroffen werden sollte. Die Kenntnisse der Lernenden über akademische Inhalte durch Laborarbeit zu verbessern, ist nur ein mögliches gewünschtes Ergebnis. Weitere Beispiele sind das Erlangen von Kenntnissen sowie das Verständnis für die Prinzipien des experimentellen Designs und die Fähigkeit, diese anzuwenden (Lewis 2014). Wenn man ein Phänomen veranschaulichen möchte, das andernfalls nicht realisiert werden könnte, da es nicht beobachtbar ist oder die Ressourcen nicht zu Verfügung stehen, ist ein virtueller Zugang eine gute Möglichkeit, vor allem dann wenn die Alternative eine rein theoretische Vermittlung bedeuten würde. Virtuelle Labore konzentrieren sich auf die Datenerfassung, -analyse und -synthese (Grisham 2009). Ma und Nickerson (2006) kritisieren, dass nach der Theorie des situierten Lernens davon auszugehen ist, dass die Lernenden von den Simulationen im Wesentlichen lernen, wie die Simulation zu bedienen ist. Physische Labore sind dann von Vorteil, wenn das Unterrichtsziel darin besteht, dass die Schüler eine ausgefeilte Erkenntnistheorie der Wissenschaft erlernen sollen, einschließlich der Fähigkeit, unvollständige Messungen zu verstehen und experimentelle Fertigkeiten zu erwerben. Braun (2003) erklärt, dass virtuelle Labore dies tatsächlich nicht leisten können und wenn dies das Ziel eines Kurses ist, müssen die Experimente notwendigerweise mit Tierpräparaten durchgeführt werden (vgl. Lewis 2014).

Bezüglich der Lernergebnisse zeigt Brinson (2015) in seinem Review sehr ausführlich die aktuellen (ab 2005) empirischen Studienergebnisse anhand des Vergleichs von traditionellen Laboren (Hands-on) zu nicht-traditionellen Laboren (virtuell oder Remote). Er fasst zusammen, dass knapp über 50 % der untersuchten Studien eine höhere oder gleiche Leistung in den Lernergebnissen (Wissen und Verständnis, Forschungsfähigkeiten, Praxisfähigkeiten, Wahrnehmung, analytische Fähigkeiten sowie soziale und wissenschaftliche Kommunikation) für die nicht-traditionellen Labore aufweisen. Lewis (2014) bestätigt in seinem Review für den expliziten Bereich der Biologie, dass virtuelle Labore sich als ebenso effektiv wie herkömmliche Labore erweisen, um das Wissen und das Verständnis der Lernenden zu verbessern. Beide Formate verbessern laut diverser Studien das Lernen im Vergleich zur Vermittlung ohne Labore, unabhängig von der spezifischen Disziplin. Auch für das Experimentieren mit Neurosimulationen existieren diverse Studien, in denen die Effektivität der Methodik zur Vermittlung der neurophysiologischen Prinzipien nachgewiesen wird (u. a. Grisham 2009; Jong et al. 2013; Stuart 2009; vgl. Kapitel 2.3.1). Die Auseinandersetzung mit einem sinnvollen Einsatz eines computerbasierten Lernarrangements im Bildungskontext ist wichtig, zeigen Studien doch immer wieder, dass Hands-on Experimente eine zentrale Rolle im naturwissenschaftlichen Labor spielen (Hofstein und Lunetta 2004). Die Argumente ergeben sich im Wesentlichen aus dem angenommenen Einfluss auf die Lernergebnisse und aus der angenommenen Praxistauglichkeit von

professionellen Präparationen. Brinson (2015) fasst zusammen, dass kein Konsens darüber besteht, inwiefern Fortschritte in der Technologie das Lernen im Labor beeinflussen. So zeigen manche Studien, dass virtuelle und Remote-Labore Bildungshindernisse darstellen, während andere Studien sie als nützliche Ergänzung zu Hands-on Lernprozessen sehen. Bezüglich der Lernergebnis-Dimensionen zeigt seine Review-Analyse vor allem für die Komponenten Wissen und Verständnis, dass in 87 % der Studien die Ergebnisse in den nicht-traditionellen Laboren gleich oder besser ausgefallen sind (von 95 % der Studien untersucht). Für die weiteren Lernergebnisse ergaben sich für folgende Prozentanteile gleiche oder bessere Werte bei den nicht-traditionellen Laboren: Forschungsfähigkeiten 100 % (n = 4), analytische Fähigkeiten 88 % (n = 8), Wahrnehmung 86 % (n = 30), wissenschaftliche Kommunikation 80 % (n = 5) und Praxisfähigkeiten 78 % (n = 9).

In den letzten Jahren ist die Zahl der traditionellen praktischen Labordurchführungen in den Studiengängen der Biowissenschaften zurückgegangen. Zum Teil wurden sie durch virtuelle Labore ersetzt, was mit der Zunahme der Studierendenzahlen, den hohen Kosten für herkömmliche Nasslabore und dem ethischen Umdenken bezüglich des Einsatzes von tierischen Präparaten zusammenhängt (Lewis 2014). Diwakar et al. (2014) beschreiben, dass sich auch neurowissenschaftliche Experimente auf Unterrichtsebene verändern – von detaillierten Protokollen, die chemische, physiologische und bildgebende Techniken einbeziehen hin zu computerbasierten Modellierungen. Die Autoren betrachten diese Anwendungen der Informations- und Kommunikations-Technologien als Revolutionierung der gegenwärtigen Laborszenarien hinsichtlich des aktiven Lernens. Viele Hürden und die angesprochenen Probleme der Kosten, der Ethik und der Komplexität der Durchführungen können durch „trockene Labore“ überwunden werden (Bish und Schleidt 2008; Odenweller et al. 1997). Auch Av-Ron et al. (2006) beschreiben die Vorteile des Einsatzes von Simulationen für die Neurobiologie. Gerade für die Funktionsweisen von Nervenzellen stehen aus Gründen der Ressourcenkapazität häufig keine realen Experimente zur Verfügung, sodass der Einsatz der Simulation den Lernenden eine aktive Möglichkeit zur Vermittlung von realistischen neuronalen Vorgängen bietet (vgl. Estriegana et al. 2019). **Tabelle 3** fasst die Vorteile von Simulationen mit speziellem Blick auf neurobiologische Experimente zusammen. Das Gebiet der Neurowissenschaften ist prädestiniert für den Einsatz von Simulationswerkzeugen, da die Signalübertragung von Nervenzellen durch mathematische Gleichungen beschrieben und durch Computer gelöst werden kann. Aktionspotenziale und synaptische Übertragungen können simuliert und Ergebnisse zur Visualisierung und Analyse angezeigt werden (Av-Ron et al. 2008).

Tabelle 3: Vorteile von computerbasierten Simulationen oder virtuellen Lernumgebungen im Vergleich zu physischen Experimenten, mit schwerpunktmäßigem Bezug zu neurowissenschaftlichen Versuchen.

Vorteil bezüglich	Beschreibung	Beispielliteratur
Ethische Diskussion	Computersimulationen helfen bei der Reduktion des ethisch diskutablen sowie teuren Einsatzes von Tier-Demonstrationen und Präparationen in der Lehre. Eine sorgfältige Sicht auf alternative Lehrmethoden ist gewünscht.	<i>Dewhurst 2006 Kaisarevic et al. 2017 Lewis 2014 Odenweller et al. 1997 Rochelle et al. 2016</i>
Methodische Herausforderungen	Simulationen beheben technische und methodische Probleme des realen Experiments, sodass die Lernenden sicher verlässliche Ergebnisse von vielen Messungen erhalten können. Es ist z. B. nicht einfach, eine stabile intrazelluläre Aufnahme von Aktionspotenzialen zu erhalten.	<i>Davis 2001 Diwakar et al. 2014 Diwakar et al. 2016 Grisham 2009 Guennec et al. 2002 Lewis 2014 Schettino 2014 Yoshida 2001</i>
Durchführung	Die Simulationen ermöglichen eine Aufarbeitung der Experimente, sodass ein Schwerpunkt auf die wichtigen Aspekte gelegt werden kann. Weiterhin können die Lernenden die Experimente in ihrem eigenen Tempo durchführen.	<i>Jong et al. 2013 Lewis 2014 Ma und Nickerson 2006</i>
Durchführbarkeit	Zum einen ermöglichen Simulationen Parameter-Manipulationen, die im realen Experiment nicht immer durchführbar sind. Zum anderen ermöglichen Simulationen einen Zugang zu Experimenten von anderenfalls nicht beobachtbaren Phänomenen.	<i>Av-Ron et al. 2008 Jong et al. 2013 Lewis 2014 Meuth et al. 2005</i>
Ressourcen	Simulationen reduzieren die benötigten Ressourcen: reduzierter Zeit- und Materialaufwand und in Folge auch reduzierte Kosten.	<i>Chinn und Malhotra 2002 Diwakar et al. 2016 Grisham 2009 Hofstein und Lunetta 2004 Lewis 2014</i>
Kapazität	Große Gruppen können die Experimente parallel in Kleingruppen durchführen. Alle Lernenden können dadurch aktiv eingebunden werden, anderenfalls ist häufig nur eine einzige Experimentierstation verfügbar.	<i>Chinn und Malhotra 2002 Diwakar et al. 2014 Grisham 2009 Kaisarevic et al. 2017</i>
Praxiskomponente	Eine Simulation stellt eine bessere Alternative zur reinen Theorieerarbeitung dar, wenn eine praktische Durchführung ansonsten nicht möglich ist. Beispielsweise ist es wichtig, die Eigenschaften von Aktionspotenzialen, welche die Reizbarkeit von Nerven- und Muskelzellen ermöglichen, in Unterrichts-Experimenten beobachten zu können, um sie besser zu verstehen.	<i>Barry 1990; Grisham 2009 Lewis 2014 Yoshida 2001</i>

Für einen guten und sinnvollen Einsatz von computerbasierten Laborexperimenten gibt es verschiedene Empfehlungen. Die Simulationen sollten keine Lehrbücher und Vorlesungen ersetzen, sondern durch die dynamischen Möglichkeiten ergänzen (Schettino 2014). Außerdem sollten sie keine Laborpraktiken ersetzen, die eigentlich auch real durchgeführt werden könnten (Lewis 2014). Es genügt nicht, die traditionellen Labore „eins zu eins“ zu digitalisieren, vielmehr sollten die Möglichkeiten der Programmierung ausgeschöpft werden, wobei auch das jeweilige Lernziel berücksichtigt bleiben muss (Lewis 2014). Richardson (2011) gibt zu bedenken, dass stets die Komplexität des lebenden Systems berücksichtigt werden sollte, damit bei den Lernenden keine Übergeneralisierung stattfindet. Sie müssen darüber aufgeklärt werden, dass ein lebender Organismus nicht in gleicher Weise reagiert wie eine Computersimulation und dass dessen Verhalten unvorhersehbar ist, damit nicht das Missverständnis auftritt, Lebewesen verhalten sich wie Maschinen. Auch bezüglich der biologischen Heterogenität von aufgezeichneten Messdaten im Labor sollte eine entsprechende Vermittlung stattfinden, wenn dies in der Simulation nicht implementiert ist.

2.3.1 Computerbasierte Lernumgebungen für die Vermittlung der Neurobiologie

Für virtuelle Labore werden Computermodelle erstellt, die Prozesse simulieren, wodurch deren Funktion besser verstanden werden kann. Realistische Modellberechnungen auf der Grundlage von bereits durchgeführten Experimenten ermöglichen auch das Generieren von neuen Hypothesen und Vorhersagen – abhängig von den gewählten Eingabeparametern. Nervenzellsysteme sind ein attraktives Thema für diese Modellierungsansätze. Die Möglichkeit der Berechnung der biophysikalischen Prozesse, die das neuronale Verhalten beschreiben, kann mit computerbasierter Simulation durchgeführt und visualisiert werden. Durch die Verfügbarkeit von immer leistungsfähigerer Hard- und Software werden auch immer mehr Rechenmodelle entwickelt, mit denen die Forschung unterstützt werden kann, insbesondere dann, wenn Parameter in experimentellen Verfahren nicht zugänglich sind (Av-Ron et al. 2008; Meuth et al. 2005).

Im Kontext der neurobiologischen Simulationen muss zunächst zwischen Simulationen zur Berechnung von neuronalen Netzwerken für Forschungszwecke (Brette et al. 2007) (z. B. „Genesis“ und „NEURON“) und Simulationen für den Bildungskontext (Hayes et al. 2003) (z. B. „NeuroSim“) differenziert werden. Wobei erstere manchmal eingesetzt werden, um eine Simulation für den Bildungskontext zu entwickeln. Heitler (1996) betont in seinem Kommentar in Bezug auf „Genesis“ und „NeuroSim“, dass beide Programme völlig unterschiedlich sind und eine andere Zielsetzung verfolgen. „Genesis“ richte sich an Forschungsnutzer zur Modellierung komplexer realer neuronaler

Systeme. Das Ziel von „*NeuroSim*“ sei ein Bildungsansatz der Neurophysiologie für Lernende. Für beide Felder findet sich eine Vielfalt an Umsetzungen, für die Hayes et al. (2003) einen Übersichtsartikel anbieten. Die Autoren differenzieren die Programme nach Komplexität: Demonstrationsprogramme, Modellierungspakete für Neurobiologie und generelle Modellierungstools. Für die vorliegende Arbeit von Interesse sind die Demonstrationsprogramme, da diese i. d. R. im Bildungskontext eingesetzt werden. Hayes et al. (2003) listen dazu neun Programme auf, von denen allerdings nicht mehr alle Quellenverweise nachvollziehbar sind. Fünf dieser Programme werden in der vorliegenden Arbeit betrachtet:

- *ArtMem/MemPot* (Barry 1990, 1994);
- *iCell* (Demir 2006);
- *NerveWorks*, SimBioticsoftware (u. a. Bish und Schleidt 2008);
- *NeuroDynamix* (u. a. Crisp 2012; Friesen und Friesen 2010);
- *NeuroSim*; Biosoft Software for Science (u. a. Revest 1995; Schwab et al. 1995).

Ein aktuelleres Review bietet Lewis (2014), der virtuelle Lernumgebungen aus dem Bereich der Biowissenschaften recherchierte. Er weist daraufhin, dass das Feld der existierenden virtuellen Umsetzungen weitaus größer ist als er darstellt, dass aber zu vielen der Umsetzungen keine Publikationen vorliegen, sodass er diese in seinem Review nicht berücksichtigt hat. Von seinen 36 aufgelisteten Quellen, lassen sich sieben dem Bereich der Neurosimulationen zuordnen, die daher für die vorliegende Arbeit von Interesse sind:

- *Cellular Neurophysiology* (Molitor et al. 2006);
- *Modular Digital Course in Undergraduate Neuroscience Education (MDCUNE)*; Grisham 2009);
- *NeuroDynamix* (u. a. Crisp 2012; Friesen und Friesen 2010);
- *Neurons in Action (NIA)*; u. a. Moore und Stuart 2015; Stuart 2009);
- *Oxsoft Heart*; Professor D. Noble, Oxford Universität (u. a. Guennec et al. 2002);
- *Simulator for Neural Networks and Action Potentials*; The University of Texas (*SNNAP*; u. a. Av-Ron et al. 2006; Baxter und Byrne 2007);
- *Synaptic Physiology* (Davis 2001).

Aufgrund der vielfältigen – häufig nicht publizierten – Umsetzungen sowie einzelner nicht mehr verfügbarer Quellenverweise in älteren Publikationen kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur ein Überblick gegeben werden. Dazu werden die bereits aufgelisteten und die weiteren nachstehenden Simulationen betrachtet:

- *Amrita Virtual Labs* (Diwakar et al. 2014);
- *MetaNeuron* (Newman und Newman 2013);
- *NeuroLab, NetLogo* (Schettino 2014);
- *NeuroLab, Prof. Neuron* (McGrath et al. 2003);
- *Neurophysiology Virtual Lab*; Satoshi Amagai, Howard Hughes Medical Institute, Biointeractive (u. a. Griffin 2003);
- *Netscape Navigator* (Dwyer et al. 1997);
- *Online virtual laboratory* (Wang et al. 2018);
- *Virtual Physiology Serie*, Hans A. Braun und Aubin Tchaptchet, Universität Marburg; Thieme Publ., Stuttgart / New York (u. a. Braun 2003);
- *Visual neuroscience experiments* (Mar Quiroga und Price 2016).

Die Umsetzungen weisen unterschiedliche Vermittlungsschwerpunkte auf und unterscheiden sich entsprechend in der Komplexität ihrer Gestaltung, die in sieben Kategorien unterteilt wird (**Tabelle 4**). Die Komplexität muss nicht in der Reihenfolge der beschriebenen Punkte zunehmen, vielmehr kann die Lernumgebung auch einzelne Umsetzungspunkte abdecken. Die Kategorien 2–7 begegnen den ausgeführten Kritikpunkten bezüglich computerbasierter Lernumgebungen und Simulationen von Experimenten. Den fehlenden Praxiskomponenten (u. a. Lewis 2014) kann z. B. über eine simulierte Versuchsdurchführung, wie der Kontrolle einer Mikroelektrode begegnet werden (Kategorie 3). Eine andere Möglichkeit, den Lernenden einen Gesamtüberblick über das Experiment zu bieten, ist die Darstellung der benötigten Präparation über Foto- oder Filmmaterial (Kategorie 5) oder eine interaktiv simulierte Animation der Präparation (Kategorie 6). Der Kritik der mangelnden Heterogenität und der künstlichen Säuberung der Daten (u. a. Chinn und Malhotra 2002) kann durch eine komplexere Berechnung der Daten begegnet werden, durch die eine Heterogenität berechnet wird und Messschwierigkeiten (z. B. Abbruch der Elektrode, Abnutzungserscheinungen) integriert werden können (Kategorie 4). Eine andere Möglichkeit findet sich in Neurosimulationen, die auf Grundlage von realen Forschungsexperimenten eine Simulation berechnen, denen die tatsächlichen Messungen zugrunde liegen (Kategorie 7).

Tabelle 4: Gestaltungskategorien der computerbasierten Lernumgebungen für die Vermittlung der Neurobiologie.

Kategorie	Beschreibung
1	Simulation der Membranpotenziale in Abhängigkeit von einstellbaren Parametern, basierend auf den klassischen mathematischen Gleichungen der Neurophysiologie (u. a. Nernst-Gleichung, Goldman-Hodgkin-Katz-Gleichung, Hodgkin-Huxley-Gleichung).
2	Zusätzliche Darstellung von Laborequipment und Versuchsaufbau, z. B. graphische Visualisierung des Oszillographen.
3	Implementierung der Methodik, z. B. durch eine simulierte Messelektroden-Kontrolle und den Einstich in eine Zelle.
4	Komplexere Berechnungen der Ergebnisse, u. a. zur Darstellung der natürlichen Heterogenität und weiterer möglicher Messvariationen.
5	Bereitstellung von zusätzlichem Material, wie z. B. Video- oder Fotodemonstration der realen Präparation oder Arbeitsmaterialien mit den theoretischen Grundlagen.
6	Interaktive Animation der benötigten Präparation vor der Messung.
7	Berechnung der Ergebnisdaten auf der Basis realer Forschungsreihen.

Weiterhin stellt sich auch die Auswahl der Experimente als sehr vielfältig dar. Neben der klassischen Manipulation von Parametern wie der Ionenleitfähigkeit oder -konzentration ermöglichen andere Simulationen beispielsweise die Messung von Strom- oder Spannungsklemmen. Andere Umsetzungen fokussieren die synaptische Übertragung und beinhalten Experimente zu zeitlicher und räumlicher Summation oder simulieren die Messungen von Herzzellen. In forschungsbasierten Simulationen findet man u. a. Messungen von sensorischen Nervenzellen. **Tabelle 5** fasst die betrachteten Umsetzungen zusammen und stellt den Vermittlungsschwerpunkt (Experimente), die umgesetzten Gestaltungskategorien (vgl. **Tabelle 4**) sowie ggf. Ergebnisse vorliegender Forschung dar.

Tabelle 5: Computerbasierte Lernumgebungen der Neurobiologie mit Gestaltungskriterien, integrierten Experimenten und Forschungsergebnissen.

Lernumgebung	Gestaltungskategorien							Experimente (Beispiele)	Forschung	
	1	2	3	4	5	6	7		WZ	Akz.
Amrita Virtual Labs	✓	✓			✓ T	✓		Neurophysiologische Techniken, Patch-Clamp, Current- & Voltage-Clamp	+	+
ArtMem/MemPot			✓	✓				Membranpotenziale	+	+
Cellular Neurophysiology	✓							Voltage-Clamp, Patch-Clamp (spannungs- und Liganden-gesteuert); <i>Matlab-basierte Pakete</i>	+	
iCell							✓	Herz- und Nervenzellen, Krankheiten, Drogenapplikationen		+
MDCUNE							✓	Neuronale Schaltkreise, hormonelle Effekte der ZNS Entwicklung, strukturelles MRT	+	+
MetaNeuron	✓							Membranpotenziale, Voltage-Clamp, synaptische Potenziale, Applikationen; <i>3-dimensionale Ansichten der Messspuren</i>	+	+
NerveWorks	✓	✓	(✓)		✓ T			Membran- und Aktionspotenziale, Neurotransmitter, Muskelphysiologie, eigene Zellkonfiguration	+	✗
Netscape Navigator	✓				✓ T			Aktionspotenziale gemäß dem Hodgkin-Huxley Modell, Schwellenpotenzial, Inaktivierung, Refraktärzeit, Akkommodation		
NeuroDynamix	✓				✓ T			Intrazelluläre Messungen, Voltage-Clamp	+	
NeuroLab, NetLogo				✓				Potenziale, Erregungsweiterleitung, synaptische Transmission, kortikale Entwicklung, laterale Hemmung	+	+

✓: umgesetzt, +: gesteigert/vorhanden, ✗: nicht vorhanden; T: Theorie, F: Film-/Fotomaterial; WZ: Wissenszuwachs (eingeschätzt/gemessen), Akz.: Akzeptanz

Fortsetzung Tabelle 5

Lernumgebung	Gestaltungskategorien							Experimente (Beispiele)	Forschung	
	1	2	3	4	5	6	7		WZ	Akz.
NeuroLab, Prof Neuron		✓	✓	✓	✓ T			Ruhepotenziale, Schwellenpotenziale, Refraktärphase, Membranpermeabilität	+	+
Neurophysiology Virtual Lab	✓	✓			✓ T/F			Sensorische Messungen der Nervenzellen des Bluteigel-Ganglions		
NeuroSim	✓	(✓)						Hodgkin-Huxley-Modell, Goldman-Hodgkin-Katz-Gleichung, Patch-Clamp, Netzwerksimulationen; <i>schematische Zeichnungen vom Versuchsaufbau</i>		+
NIA	✓				✓ T/F			Ruhe- und Aktionspotenzial, Membranwiderstand & -kapazität, klinische Phänomene, Voltage-Clamp, synaptische Integration		
Online virtual laboratory		✓	✓	✓		✓		Erzeugung und Weiterleitung von Aktionspotenzialen (z. B: am Ischiasnerv des Froschs)	✗	✗
Oxsoft Heart	✓							Aktionspotenziale des Herzens, Voltage-Clamp, Ionenkonzentrationen, Leitfähigkeit		
SNNAP	✓				✓ T			Neuronale Netzwerke		
Synaptic Physiology	✓							Synaptische Physiologie (zeitliche und räumliche Simulation); <i>graphische Darstellung der Neurone</i>		
Virtual Physiology Serie		✓	✓	✓	✓ F			SimNerv: Ableitung Froschnerv; SimPatch: Patch-Clamp; SimNeuron: Current-Clamp, Voltage-Clamp, Patch-Clamp	+	+
Visual neuroscience experiments					✓ T		✓	Messung von bewegungssensitiven sensorischen Neuronen		

✓ : umgesetzt, + : gesteigert/vorhanden, ✗ : nicht vorhanden; T: Theorie, F: Film-/Fotomaterial; WZ: Wissenszuwachs (eingeschätzt/gemessen), Akz.: Akzeptanz

Einzelne Umsetzungen der **Tabelle 5** werden als Beispiele für die jeweiligen Gestaltungskategorien im Folgenden näher beschrieben. Auf die Darstellung der Membranspannungen und auf die Möglichkeit, den Einfluss von unterschiedlichsten Parametereinstellungen zu untersuchen (Kategorie 1), konzentrieren sich beispielsweise die Umsetzungen „*NeuroSim*“, „*NIA*“, „*NeuroDynamix*“, „*SNNAP*“ und „*NerveWorks*“.

Die explizit für den Unterricht entwickelte „*NeuroSim*“ Umgebung beinhaltet in der aktuellen Version sechs Module, die jeweils einen bestimmten Aspekt der neuronalen Funktion simulieren. Die Veränderung von Parametern zeigt die resultierenden dynamischen Spannungskurven (Biosoft: Software for Science 2015). Die Programmierung ermöglicht eine flexible Anpassung der Oberfläche, sodass die Lehrkraft (oder der Benutzer) Parameter von Interesse auswählen kann (Revest 1995). Neben der Simulation sind schematische Zeichnungen vom Versuchsaufbau sowie beispielsweise von Membrankanalmodellen verfügbar.

„*NIA*“ stellt zusätzlich Theoriematerialien in der Oberfläche zur Verfügung und viele Tutorials bieten Filme über die Spannungsänderungen entlang des Axons. Die Simulation wurde – basierend auf der eher im Forschungsbereich angesiedelten Simulationssoftware „*NEURON*“ (Michael Hines, John W. Moore, Yale Universität) – von John W. Moore und Ann E. Stuart für den Bildungsbereich entwickelt (Moore und Stuart 2015). Barry (2004) bietet zu dem Programm ein Media-Review, worin sie die Anwendungsmöglichkeiten beschreibt. „*NIA*“ umfasst 17 Tutorials, die in ihrer Komplexität variieren. Sie können zum Einsatz kommen, um den Lernenden die Neurophysiologie auf jedem Level zu vermitteln. Die manipulierbaren Parameter sind u. a. die Geometrie, die Anzahl und Art der Ionenkanäle in der Membran, die Anzahl der Myelin-Wicklungen des Axons, die Innen- und Außenionenkonzentrationen, synaptische Variablen und die Temperatur. Die Tutorials bieten außerdem häufig eine historische Perspektive auf bahnbrechende Experimente und Experimentatoren (vgl. Stuart 2009). Friesen und Friesen (2010) stellen die Nachfolgeversion von „*NeuroDynamix*“ vor, die beispielsweise im Vergleich zu „*NeuroSim*“ als komplexere Modellierungsumgebung betrachtet werden muss. Das Buch bietet eine umfassende Erläuterung der zugrunde liegenden Theorie und zu jedem Kapitel eine vorkonfigurierte Modellierungsübung mit der Simulationssoftware. „*NeuroDynamix II*“ simuliert die dynamischen Eigenschaften von Neuronen auf mehreren Organisationsebenen: dem Membranfeld, den neuronalen Kompartimenten (Dendrit, Soma, Neurit und Axon), den einzelnen Neuronen und den synaptischen Wechselwirkungen innerhalb neuronaler Schaltkreise (bis zu 100 Neuronen). Basierend auf einer benutzerfreundlichen, leicht zugänglichen graphischen Oberfläche fördern die Modelle die aktive Erforschung physiologischer Eigenschaften durch die Manipulation von Modellparametern. So bietet das Buch in Kombination mit der Software eine enge Wechselbeziehung zwischen didaktischer textlicher Ausarbeitung und Simulation.

„*SNNAP*“ ist grundsätzlich in die Kategorie 1 einzuordnen, stellt sich aber insofern komplexer dar, als es auf der Basis der selbstständigen Programmierung der gewünschten Simulation arbeitet. Das Programm und seine Möglichkeiten werden u. a. beschrieben von Av-Ron et al. (2006; 2008) und Baxter und Byrne (2007). Die Umgebung stellt eine Schnittstelle der Neurosimulationen zwischen Forschungsbereich und Anwendung in der Bildung dar. Das Programm ist leistungsfähig genug, um komplexe biophysikalische Eigenschaften von Neuronen, Synapsen und neuronalen Netzwerken zu simulieren und das bei gleichzeitig ausreichender Benutzerfreundlichkeit, sodass nur ein minimaler Zeitaufwand nötig sei, um mit dem Simulator zu arbeiten. Dazu wird eine graphische Programmierungsoberfläche bereitgestellt (Av-Ron et al. 2006, 2008; Baxter und Byrne 2007). Die Simulation bietet also die Möglichkeit, neuronale Netzwerke und ihre Interaktion zu verstehen, indem diese mathematisch modelliert und die biophysikalischen und biochemischen Eigenschaften der Neuronen und Synapsen dargestellt werden (Baxter und Byrne 2007). Es können realistische Modelle einzelner Neuronen und Neuronen-Netzwerke programmiert werden. Außerdem umfasst „*SNNAP*“ neben dem Neurosimulator ein Tutorial-Handbuch und über 100 Beispielsimulationen, die die Funktionalität des Programms sowie viele grundlegende Prinzipien der Neurowissenschaften veranschaulichen. Dieses Bibliothekssystem bietet Standardmodelle für elektrische Aktivitäten von Neuronen und chemische Wechselwirkungen von Rezeptoren, die von den Lernenden kombiniert werden können, um neuronale Prozesse und Netzwerkschaltungen zu simulieren (Av-Ron et al. 2006, 2008).

„*NerveWorks*“ bietet einen ersten Ansatz zur zusätzlichen Darstellung des Laborequipments (u. a. Oszilloskop, Verstärker und Spannungsklemmen), wobei dies in der Oberfläche noch relativ simpel gestaltet wird (Kategorie 2). Die Geräte müssen vom Benutzer entsprechend angeschlossen werden, was in Ansätzen Kategorie 3 widerspiegelt. Die Experimente decken eine große Bandbreite ab. Die Software bietet weiterhin die Möglichkeit, eigene Labore und Modelle zu erstellen, beispielsweise eine eigene Zelle zu konfigurieren, eigene Kanäle und Medikamente zu definieren, neue Lösungen zu entwickeln oder neue Instrumente in das Experiment einzubeziehen (Meir 2004).

Andere Simulation sind Bestandteil von umfangreicheren kompletten Lernumgebungen, beispielsweise das „*Neurophysiology Virtual Lab*“ oder die virtuelle Lernumgebung „*Amrita Virtual Labs*“. Griffin (2003) arbeitet in seinen Neurobiologiekursen an der Universität mit einer kompletten virtuellen Kursumsetzung (Kurswebseite als Ressourcen Center, PowerPoint Präsentationen, interaktive Software und ein physiologisches computerbasiertes Aufzeichnungsprogramm u. a. für EKG-Aufzeichnungen). In dem Umfeld setzt er u. a. das „*Neurophysiology Virtual Lab*“ ein. Im simulierten Experiment werden Messungen am Blutegel-Ganglion durchgeführt, was durch die thematische Nähe von besonderem Interesse für die vorliegende Arbeit ist. Das virtuelle Labor stellt vielfältige Hintergrundmaterialien zur Verfügung, in denen alle erforderlichen Grundlagen für das Experiment

erklärt werden (z. B. Biologie des Blutegels, Aktionspotenziale, Methodik der Messung). Anhand einer Fotodokumentation wird die Präparation des Ganglions beschrieben. Diese belässt ein Ganglion in intakter Verbindung zu einem Hautstück des Egels. So können taktile Empfindungen untersucht werden, indem die sensorischen Neuronen des segmentalen Ganglions abgeleitet werden. Im Experiment kann der Benutzer ein gewünschtes Neuron zur Messung auswählen und anschließend das Präparat mit unterschiedlichen sensorischen Reizen (Pinsel, Sonde und Pinzette) stimulieren. Die Antwort der Nervenzellen wird visuell und auditiv wiedergegeben. Mit dem Wissen darum, dass jedes Neuron eine spezifische Charakteristik aufweist und die Aktivitätsmuster individuell sind, kann der Benutzer anschließend seine Messung einer beschriebenen Nervenzelle zuordnen. Außerdem wird die Morphologie der Nervenzellen über eine Visualisierung mit Fluoreszenzaufnahmen dargestellt.

Die virtuelle Lernumgebung „*Amrita Virtual Labs*“ von Diwakar et al. (2014) entstand in Indien primär aufgrund wirtschaftlicher Fragestellungen. Die frei zugänglichen umfangreichen Inhalte zur Ergänzung der Seminare über die zellulären Neurowissenschaften legen auf die Theorie ebenso viel Wert wie auf die Experimentiertechnik und Computermodellierungen. Die Lernumgebung beinhaltet u. a. mathematische Simulationen, Remote-Labore und interaktive Animationen. Jeder Versuch besteht dabei aus den Komponenten Theorie, Versuchsbeschreibung, Selbsteinschätzung, Musteraufgaben, interaktive Animationen oder Simulationen bzw. Remote-gesteuerter Bereich, Referenzen und Feedback. Basierend auf dem mathematischen Modell von Hodgkin-Huxley wurde auch ein „*Neuron Simulator*“ graphisch und webbasiert entwickelt und implementiert (programmiert mit MatLab). Damit kann eine Vielzahl von biophysikalischen Eigenschaften eines Neurons studiert werden.

Die Simulationen „*MemPot/ArtMem*“, „*Virtual Physiology Serie*“, „*NeuroLab, Prof. Neuron*“ sind Beispiele für Umsetzungen, denen komplexere Berechnungen der Ergebnisse zugrunde liegen, um die natürliche Heterogenität und weitere mögliche Messvariationen abzubilden (Kategorie 4).

Barry erläutert zu seinen Umsetzungen „*MemPot*“ (1990) und „*ArtMem*“ (1994), dass die Prinzipien der experimentellen Messung befolgt werden und der Anspruch besteht, dass die Experimente in einer dem Laborexperiment vergleichbaren Art und Weise durchgeführt werden, mit typischen experimentellen und biologischen Variationen. „*MemPot*“ simuliert die Messung von Membranpotenzialen an mehreren erregbaren Zellen. Die Vermittlung von realen Membranpotenzial-Messung im Labor wird u. a. über die Bewegung von virtuellen Mikroelektroden auf dem Bildschirm realisiert, über beschädigte Zellen bei einem schlechten „Elektrodenanstich“ oder über Variationen der Membranpotenzial-Amplituden von Zelle zu Zelle (Kategorie 2) (Barry 1990). „*ArtMem*“ wird eingesetzt, um den Studierenden das zugrunde liegende Konzept von Membranpotenzialen und die Messung elektrischer Potenziale über einer ionenselektiven Membran zu vermitteln. Das Programm

wurde entwickelt, um ein bisheriges reales Experiment mit Kunstharzmembranen zu ersetzen. Auch wenn sich die ursprüngliche Labordurchführung als effektiv erwiesen hatte, um die Studierenden beim Lernen der Konzepte zu unterstützen, ergaben sich immer wieder praktische Probleme und die begrenzte Anzahl von Versuchsaufbauten führte zu einer nicht optimalen Beteiligung der Studierenden. Daher wurde das Experiment in eine Simulation umgestaltet, wobei nahezu jedes Merkmal des Experiments berücksichtigt wurde (z. B. ungerührte Schichteffekte, Verunreinigungen durch Vermischen der Lösung, mögliche Effekte durch Flüssigkeitsübergänge). Darüber hinaus werden einige dieser Funktionen und die Vorgehensweise bei der Datenanpassung mithilfe der Computersimulation sogar deutlicher gezeigt (z. B. Lösungskontaminationseffekte, Salzaustritt und Effekte ungerührter Schichten). Realität wird suggeriert, indem die Studierenden die externe Elektrode ebenso wie in der „MemPot“ Umsetzung während des Wechsels der externen Lösung vom äußeren Bad in das innere Bad bewegen, sodass die Möglichkeit eines Elektrodenbruchs besteht und die Lösungsänderungen grafisch unter Einbeziehung von Soundeffekten simuliert werden. Außerdem ist eine gewisse Zufälligkeit eingebaut, sodass verschiedene Durchläufe leicht unterschiedliche Ergebnisse liefern. Eine zusätzliche "experimentelle" Variabilität kann eingeführt werden, wenn die Lernenden entweder die Lösungen nicht oft genug ändern oder zu lange warten, bevor sie das Potenzial messen, wie dies bei einem tatsächlichen Experiment der Fall sein könnte (Barry 1994).

In seiner Arbeit von 2003 beschreibt Braun sehr ausführlich die Entstehungsgeschichte und die Idee der „*Virtual Physiology Series*“. Aufbauend auf der ersten Simulationsumsetzung „*MacFrog*“ entstand die Serie mit: „*SimNerv*“, „*SimMuscle*“, „*SimVessel*“, „*SimHeart*“ und „*SimPatch*“. Die Programme bilden die Experimente ab, die zuvor mit echten Tierpräparaten in Kursen in Physiologie oder Pharmakologie durchgeführt worden sind. Die Oberflächen stellen voll ausgestattete Labore dar, in denen alle Geräteeinstellungen per Mausklick frei vorgenommen werden können. Die zugrunde liegenden mathematischen Algorithmen reproduzieren realistische Reaktionen abhängig von den gewählten Einstellungen. Darüber hinaus werden Zufallsvariablen eingesetzt, um die natürliche Variabilität der Präparationen zu berücksichtigen. Tchaptchet et al. (2013) beschreiben die Funktionen der neurophysiologischen Simulationen genauer. „*SimNerv*“ simuliert die Ableitung von Summenpotenzialen des Ischias-Nervs am Frosch. Das integrierte virtuelle Labor besteht aus einer Stimulationskammer, einem Stimulator und einem Oszilloskop. Zunächst werden Informationen zur Lebensweise der Frösche vermittelt, damit die Lernenden das Tier als Ganzes betrachten. Danach wird die vorbereitende Präparation des Ischias-Nervs unter Einsatz von Videos demonstriert und erklärt. In der dann anschließenden Simulation zur Messung werden die Ergebnisse der Messungen auf dem Bildschirm des Oszilloskops angezeigt. Dabei wird auch ein Gewöhnungsphänomen durch übermäßige Stimulation sowie unterschiedliches Verhalten für jeden untersuchten Nerv beachtet (vgl. Fischer et al.). Auf dieser Serie aufbauend entstand auch eine neuere Reihe fortschrittlicher

virtueller Computerlabore, die „cLabs“, welche die Idee von „SimPatch“ aufgreifen und Experimente bieten, die zu schwierig sind, um sie in studentischen Übungen durchzuführen, aber *in silico* möglich sind. Beispielsweise „cLabs-Neuron“, ein virtuelles Labor für Ionenkanalaufzeichnungen, sowie Current-Clamp und Voltage-Clamp Experimente (Braun 2003).

Die „NeuroLab“ Umsetzung von McGrath et al. (2003) implementiert neben einer Heterogenität in den Messungen und einer ähnlichen Methodendurchführung wie bei Barry ebenfalls eine Darstellung der Laborgeräte sowie Theoriematerial. In der Laborsimulation „stechen“ die Lernenden in Nervenzellen ein, um anschließend vielfältige Experimente durchzuführen. Die Autoren bemängeln, dass in vielen anderen Simulationen wenig Wert auf eine realistische Simulation des physiologischen Labors gelegt wird. Viele der Simulationen für Anfänger vermittelten keinen Sinn für Realität, da die Aktivität oft nur im Klicken der Maus bestünde. Daher versucht man in „NeuroLab“, eine realistischere Simulation eines elektrophysiologischen Labors umzusetzen, indem beispielsweise die verwendete Mikroelektrode beim Zelleinstich abbrechen oder herausrutschen kann, durch die Zelle durchgestochen werden kann oder an der Spitze verstopft. Nur in 50 % der Versuche erhalten die Benutzer einen "guten Einstich“. Weiterhin müssen das Oszilloskop und der Stimulator auf sachkundige Weise eingestellt werden. Die simulierten Experimente unterscheiden sich auch in ihren generierten Daten im Rahmen der realen Heterogenität und erfordern daher eine unabhängige Interpretation und Bewertung. Dies soll durchgehend ein Gefühl der Realität fördern und die Interaktivität zwischen dem Benutzer und der Software auf hohem Niveau halten.

Die Umsetzungen „iCell“ und „Visual neuroscience experiments“ sind Beispiele für Simulationen der Kategorie 7, in denen der Simulationsberechnung die Daten realer aufwändiger Forschungsexperimente zugrunde liegen.

Demir (2006) entwickelte die „iCell“ Simulation, in der Forschungsergebnisse für die Lehre bereitgestellt werden. Dabei handelt es sich um unterschiedliche JAVA-codierte Modelle von Herz- und Nervenzellen, deren bioelektrische Aktivitäten auf zellulärer Ebene simuliert werden. In jedem Modell können über eine Menüsteuerung Parameter oder Bedingungen verändert und die resultierenden Ergebnisse beobachtet werden. Den Simulationen liegen biophysikalisch detailliert berechnete Modelle zugrunde, die auf experimentellen veröffentlichten Daten basieren. Daher wird die Simulation auch eingesetzt, um Hypothesen bezüglich Kontrolle, Krankheiten und Drogenapplikationen zu überprüfen sowie um das Verständnis von lebenden physiologischen Systemen auf Zellebene zu erweitern. Demir (2006) ist der Meinung, dass Computermodelle auf experimentellen Daten aufbauen sollten, um nicht nur die implementierten Daten zu erklären, sondern auch um Ergebnisse von Experimenten vorhersagen zu können, die noch nicht durchgeführt worden sind. Jedes JAVA-codierte

Modell gibt einen Überblick über die Zelle, illustriert die Zellmembran mit einem elektrischen Ersatzschaltbild und zitiert die zugehörige veröffentlichte Forschungsarbeit für weitere Informationen. Die „*Visual neuroscience experiments*“, entwickelt von Mar Quiroga und Price (2016), bieten eine Simulation zum Verständnis der sensorischen Neurowissenschaften. Die Umgebung gliedert sich in vier Abschnitte:

- 1) theoretisches Hintergrundmaterial;
- 2) Anweisungen zum Ausführen der Simulation;
- 3) interaktive Simulation;
- 4) Möglichkeit zum Herunterladen der generierten Daten.

Bei der Simulation von extrazellulären Aufzeichnungen bewegungsempfindlicher Neurone können die Lernenden die Stimulationsparameter (Richtung und Kontrast) kontrollieren. Die Reaktionen auf die Reize werden visuell und auditiv präsentiert. Zur Programmierung der neuronalen Antworten und Anzahl der Spikes liegt der Simulation ein mathematisches Modell zugrunde, das auf den experimentellen Daten eines visuellen neurowissenschaftlichen Experiments beruht und realistische Eigenschaften und Variabilität generiert. Mar Quiroga und Prica (2016) geben an, dass so die Experimente ohne eine Beeinträchtigung der Datenrealität „erlebt“ werden können, indem zufällig erzeugte Neurone mit variablen Abstimmungseigenschaften generiert werden. Neben dem Einblick in die Neurophysiologie bietet die Umsetzung auch einen Zugang zur experimentellen Planung, Datenerfassung und -analyse. Damit schließt die Simulation eine Lücke in der biomedizinischen Ausbildung, indem sie den Studierenden ermöglicht, ein Experiment durchzuführen, das sie aufgrund finanzieller, zeitlicher und ethischer Einschränkungen sonst nicht durchführen könnten.

Forschungsergebnisse der dargestellten virtuellen Lernumgebungen

Wie **Tabelle 5** zu entnehmen ist, konnten die meisten Arbeiten bei den Lernenden einen gemessenen oder (selbst)eingeschätzten Wissenszuwachs und/oder eine Akzeptanz gegenüber der Lernumgebung nachweisen. Schwab et al. (1995) setzten die „*NeuroSim*“ Simulation vergleichend neben einer realen Oocyten-Messung und einer Messung mit einer Kalium-Makroelektrode ein. Die Studierenden bewerteten anhand einer Frage zur Qualität die Simulation am höchsten, bevorzugten aber gleichermaßen die Kombination mit den experimentellen Übungen. Die Umsetzung „*iCell*“ wurde in den Rückmeldungen der Studierenden primär positiv bewertet. Sie gaben an, die Inhalte zu verstehen, die Simulation gerne anzuwenden und sie als informativ zu empfinden (Demir 2006). Für

„ArtMem“ zeigt Barry (1994), dass 84 % der Studierenden die Simulation als angenehm empfanden, 93 % sie als hilfreich für das Verständnis des Themas und 86 % als hilfreich für das Erlernen neuer Informationen bewerteten. Diwakar et al. (2014) weisen die Akzeptanz der „Amrita Virtual Labs“ mit dem TAM (vgl. Kapitel 4.1) nach und zeigen auf, dass die Studierenden die Umsetzungen als benutzerfreundlich und nützlich empfinden. Weiterhin empfinden sie einen relativen Vorteil beim Lernen der neurophysiologischen Inhalte im Vergleich zu der traditionellen Klassenraum-Bildung. Die Autoren stellen außerdem verbesserte Ergebnisse in einzelnen Lernszenarien fest. Für „SimNerv“ aus der „Virtual Physiology series“ liegt eine Evaluierung vor, in der die Studierenden angeben, dass die Nutzung der virtuellen Geräte keine Schwierigkeiten bereitet hat. Die Lernenden waren der Meinung, dass „SimNerv“ dazu beiträgt, das Verständnis der Nervenphysiologie zu verbessern und die meisten gingen davon aus, dass sie sogar mehr als im realen Experiment gelernt haben. Die grundsätzliche Einstellung zum Einsatz von Multimedia-Simulationen erwies sich im Vorfeld bereits als eher positiv und wurde durch die Verwendung nochmal signifikant positiver bewertet (Braun 2003). Ähnliche Ergebnisse erhielten Newman und Newman (2013) bezüglich der „MetaNeuron“ Umsetzung, die von den Studierenden als außergewöhnlich, sehr nützlich und/oder zufriedenstellend bewertet wurde. Weiterhin schätzen die Autoren anhand von Hausaufgaben und Prüfungsfragen einen Wissenszuwachs ein. Für die „Swimmy“ Simulation aus den „MDCUNE“ Angeboten erhielt Grisham (2009) ausnahmslos positive Rückmeldungen. Die Umsetzung wird von den Studierenden mit eindeutigem Vorteil gegenüber klassischen Laboren bewertet. Außerdem geben sie an, Fortschritte in ihren neurowissenschaftlichen Kenntnissen und ihren Fähigkeiten bezüglich neurowissenschaftlicher Fragestellungen zu erlangen (vgl. Grisham et al. 2008). In einer Studie zur Verwendung von „NeuroLab, Prof. Neuron“ wurde sowohl ein selbsteingeschätzter Wissenszuwachs nachgewiesen als auch ein gemessener anhand eines Wissenstests zu Membranpotenzialen. Die Lernenden empfanden das Programm als lohnende Lernerfahrung und äußerten den Wunsch nach mehr computerbasierten Umsetzungen (McGrath et al. 2003). Auch Crisp (2012) erhob einen Prä-Post Wissenstest für die „NeuroDynamix II“ Umsetzung, der zeigte, dass nach Anwendung der Simulation ein tieferes Verständnis für das Thema der neuronalen Erregbarkeit vorlag. Die Bewertung bezüglich der „NeuroLab, NetLogo“ Simulation war größtenteils positiv und führte zu besseren Noten bei den Studierenden (Schettino 2014).

Aber auch gegenteilige Ergebnisse sind in Studien zu finden. Bish und Schleidt (2008) setzten neben anderen Umsetzungen auch die Simulation „NerveWorks“ in einem neurobiologischen Kurs ihrer Studierenden ein. Obwohl sich die Verwendung der Simulationen zwar positiv auf das Verständnis der Studierenden auswirkte und alle Umsetzungen als relevant für den Wissenserwerb innerhalb des Gesamtkurses erachtet wurden, zeigte die Rückmeldung bezüglich der „NerveWorks“ Software, dass diese als schwierig und uninteressant eingestuft wurde. Auch Wang et al. (2018) erhielten in ihrer

Vergleichsstudie keine positiven Ergebnisse für das „*Online virtual laboratory*“. In ihrer Studie vergleichen die Autoren die Auswirkung des virtuellen Labors mit einem Hands-on Labor und einem Blended-Labor auf das Lernen und die Wahrnehmung von Medizinstudierenden auf die wissenschaftliche Arbeitsweise. Die Studierenden des virtuellen Labors erzielten signifikant niedrigere Werte in einem Wissenstest als die der beiden anderen Gruppen. Die Studierenden der Blended- und Hands-on Labore erzielten gleich gute Ergebnisse. Weiterhin zeigt sich in einer Einstellungsumfrage, dass die Studierenden des virtuellen Labors ihre verwendete Forschungspraxis unattraktiver und uninteressanter empfinden. In der Blended-Laborgruppe bestätigte die Einstellungsumfrage jedoch den Wert des virtuellen Labors, da die Studierenden der Ansicht waren, dass das virtuelle Labor ihnen helfen kann, das Kursmaterial effektiver zu erlernen als mit der Präparation im Hands-on Labor.

2.4 Neurobiologie an außerschulischen Lernorten

Filtert man im LernortLabor-Atlas (2019) nach der Fachrichtung „Biologie“, finden sich noch 183 Angebote. Darunter sind 19 Einrichtungen, die neurobiologische und verhaltensbiologische Themen im weitesten Sinne anbieten. Die Mehrzahl dieser Einrichtungen stellt nach der Kategorisierung von Haupt et al. (2013) ein klassisches Schülerlabor bzw. Lehr-Lern-Labor dar.

Eine detaillierte Beschreibung der Versuche zur Neurobiologie an den unterschiedlichen außerschulischen Lernorten und eine Zuordnung zur jeweiligen Einrichtung finden sich in Anhang A. Bei der Auflistung wurde sich um Vollständigkeit bemüht, indem alle Lernorte mit biologischen Inhalten und deren Angebote mit Hilfe des LernortLabor-Atlas (2019) und der jeweiligen Internetauftritte recherchiert wurden. Für weitergehende Informationen und zur Verifizierung der Übersicht wurde zusätzlich eine weitergehende Recherche durchgeführt und bei unklaren Versuchsabläufen eine Kontaktaufnahme mit den zuständigen Betreibern per E-Mail vorgenommen, um genauere Auskünfte zu erhalten.

In vier der Einrichtungen werden Themen zur Wahrnehmung und Sinnesphysiologie für Kinder ab dem Grundschulalter vermittelt. Es handelt sich dabei in drei Fällen um offene Einrichtungen bzw. sogenannte Mitmachmuseen und einmal um ein Angebot zum Gehör für Schüler der 5.–6. Klasse in einem universitären Schülerlabor. In 10 (5,5 %) der 183 Einrichtungen finden sich neurobiologische Angebote für die Sekundarstufe I und in 9 (5,0 %) für die Sekundarstufe II (**Abbildung 4**).

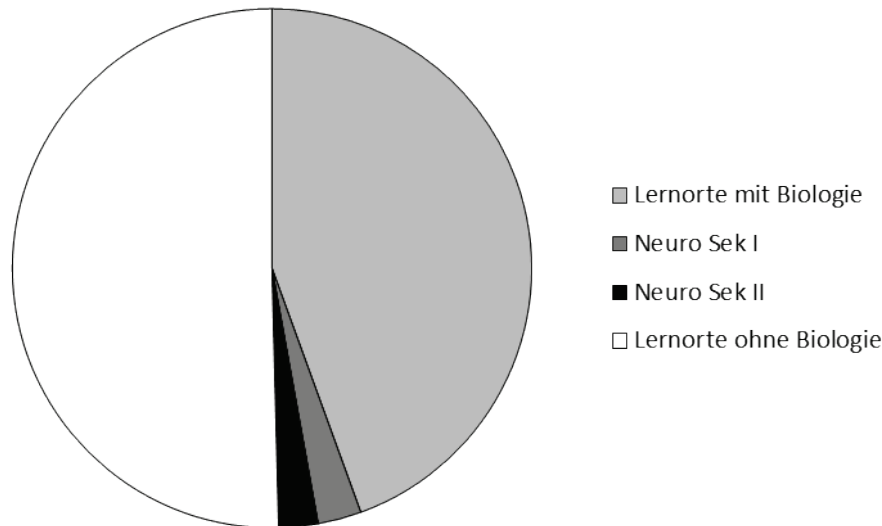


Abbildung 4: Prozentuale Verteilung der Lernorte mit biologischen Inhalten und der davon anteiligen Lernorte mit neurobiologischen Inhalten.

An 186 der 369 MINT-Lernorte finden sich keine biologischen Angebote (Weiß), 183 außerschulische Lernorte bieten biologische Angebote an (Grautöne). Von diesen finden sich in 10 Einrichtungen neurobiologische Angebote für die Sekundarstufe I (5,5 %) und in 9 Einrichtungen für die Sekundarstufe II (5,0 %).

In den 19 Einrichtungen mit neurobiologischen Themen ab Sekundarstufe I werden Versuche zu extra- (8 Lernorte) und intrazellulären (4 Lernorte) elektrophysiologischen Messungen, zur Neurophysiologie (7 Lernorte), -anatomie (6 Lernorte) und -pathologie (2 Lernorte) sowie zum Themenfeld Verhaltensbiologie (7 Lernorte) angeboten (**Tabelle 6**). Die Themenfelder, zu denen im untersuchten „Schülerlabor Neurowissenschaften“ Versuche angeboten wurden, sind in **Tabelle 6** mit der entsprechenden Farbcodierung markiert (vgl. Kapitel 5.2).

Der Anteil der Lernorte, der neurobiologische Themen für die Sekundarstufe II anbietet (5 %), kann als relativ gering gewertet werden. An nur 4 dieser Lernorte (2 %) haben Schüler die Möglichkeit, Erfahrungen mit intrazellulären elektrophysiologischen Messungen zu machen. Wie **Tabelle 6** zu entnehmen ist, handelt es sich dabei einmal um eine Messung an einer künstlichen Membran, einmal an einer Pflanzenzelle, einmal an einem Frosch Oozyten und nur zweimal um eine Messung an einem Ganglion (Schnecke und Blutegel). Versuche mit extrazellulären Messungen finden sich vergleichsweise häufig (20 Versuche, an 8 Lernorten). Ebenfalls überraschend gering abgedeckt sind Versuche zur Verhaltensbiologie. Zwar finden sich an 5 Lernorten Inhalte zur Thematik Lernen und Gedächtnis, an nur 2 Lernorten wird jedoch die Durchführung von Verhaltensversuchen mit Tieren angeboten.

Tabelle 6: Die Anzahl der neurobiologischen Versuche, die in deutschen Schülerlaboren angeboten werden (Stand: September 2019).

Versuch	Sekundarstufe I	Sekundarstufe II
Extrazelluläre Elektrophysiologische Messungen	2	20
Elektrophysiologie am Regenwurm	-	4
Elektrophysiologische Messungen an Pflanzenzellen	-	1
Elektrophysiologie am Schabenbein	-	2
Elektrische Fische (Verhalten & Messungen)	-	2
EMG / Reflexe	1	4
EKG	1	3
EEG		2
Elektroretinogramm (Auge Heuschrecke) & Aktionspotenziale Interneurone	-	1
Elektrookulographie	-	1
Intrazelluläre Elektrophysiologische Messungen	-	5
Blutegel-Ganglion	-	1
Schnecken-Ganglion	-	1
Frosch-Oozyten	-	1
Elektrophysiologische Messungen an Pflanzenzellen	-	1
Künstliche Membran	-	1
Physiologie / Anatomie / Pathologie	8	13
Wahrnehmung / Sinnesphysiologie	3	3
Eyetracking	-	1
Anatomie Gehirn / Präparationen	1	4
Mikroskopie Nervenzellen / Färbemethoden	3	3
Neurodegenerative Erkrankungen	-	2
MRT / PET u. ä.	1	-
Verhalten	4	7
Lernen und Gedächtnis	1	5
Lernversuche Fruchtfliege / Konditionierung / Verhalten	3	2
	14	45

Die Themenfelder, zu denen auch im untersuchten „Schülerlabor Neurowissenschaften“ Versuche angeboten werden sind farblich markiert (blau: Angebote für die Sek. I, grün: SLT „Verhalten“, rot: SLT „Summenpotenzial“, gelb: SLT „Elektrophysiologie“; vgl. Kapitel 5.2).

2.4.1 Das untersuchte Schülerlabor – Goethe-BioLab

Nach der Kategorisierung von Haupt et al. (2013) handelt es sich beim Goethe-BioLab an der Goethe-Universität Frankfurt in der Abteilung für Didaktik der Biowissenschaften um ein klassisches Schülerlabor mit anteiligem Lehr-Lern-Labor (vgl. Dierkes 2010). Erstgenanntes definiert sich durch ein Engagement in der Breitenförderung und findet sich häufig an Universitäten. Dabei werden die Veranstaltungen im Klassenverband besucht und eine Orientierung am Curriculum angestrebt, so dass der Besuch eine Ergänzung zum Schulunterricht darstellt. Lehr-Lern-Labore sind dadurch gekennzeichnet, dass die Schülerlabore in die fachdidaktische Lehramtsausbildung an Universitäten eingebunden werden. Die Klassen werden hier von Lehramtsstudierenden betreut, welche die Konzepte teils selbst entwickelt haben und manchmal auch forschungsgeleitet begleiten (Haupt et al. 2013; LernortLabor 2019).

Eingerichtet wurde das Goethe-BioLab 2008 mit dem Ziel des Wissenstransfers aus Forschung und Wissenschaft in die Schule sowie des direkten Kontakts zu Schülern. Diese haben in dem Labor die Möglichkeit, mit „*modernen Forschungsmethoden zu arbeiten, eigenständig Experimente durchzuführen und einen Einblick in die Forschungstätigkeiten des Fachbereichs Biowissenschaften zu gewinnen*“ (Dierkes 2010, S. 44). Die Laborangebote sind thematisch vielfältig, decken alle Klassenstufen der weiterführenden Schulen ab und orientieren sich an den aktuellen Curricula mit dem Ziel der einfachen An- und Einbindung in Unterrichtsabläufe. Zurzeit (Stand: September 2019) gibt es Angebote zu den Themenfeldern Atmung, Blut, Biomembranen, Diffusion & Osmose, Genetik, Photosynthese sowie zur Evolution. Im Jahr 2018 besuchten das Schülerlabor 1050 Schüler an 55 Terminen. Die SLT werden immer wieder mit unterschiedlichen Arbeiten wissenschaftlich begleitet.

Im Jahr 2014 wurde das „Schülerlabor Neurowissenschaften“ als Kooperationsprojekt zwischen der Goethe-Universität Frankfurt und der Gemeinnützigen Hertie-Stiftung ins Leben gerufen und in das bestehende Konzept der Schülerlabors Goethe-BioLab integriert. Insgesamt wurde das „Schülerlabor Neurowissenschaften“ 2015–2018 von 2.262 Schülern an 157 Terminen besucht, wobei die Angebote für die Sekundarstufe II mit 124 Terminen am höchsten frequentiert waren. In Kapitel 5 werden die Konzepte der SLT, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt und wissenschaftlich begleitet wurden, im Detail dargestellt.

3 Motivation

In der vorliegenden Arbeit wurden zur wissenschaftlichen Untersuchung des entwickelten EPhys-Setups und der Neurosimulation (vgl. Kapitel 5.3) Skalen eingesetzt, zu deren Grundlagen Motivationstheorien gehören. Die dafür relevanten Inhalte der Theorien werden im Folgenden kurz erläutert und anschließend die für die eingesetzte Lab Motivation Scale grundlegenden Theorien genauer beschrieben.

Motivation bezeichnet die „*Gesamtheit der Beweggründe, Einflüsse, die eine Entscheidung, Handlung o. Ä. beeinflussen, zu einer Handlungsweise anregen*“ (Bibliographisches Institut GmbH 2019) oder wie Ryan und Deci (2000a, S. 54) beschreiben: „*To be motivated means to be moved to do something*“. In der Forschung unterscheidet man unterschiedliche Typen der Motivation, basierend auf den unterschiedlichen Gründen oder Zielen, die eine Handlung hervorrufen. Eine der grundlegenden Unterscheidungen beschreibt, wieso eine Aktivität durchgeführt wird, und differenziert zwischen extrinsischer und intrinsischer Motivation (u. a. Ryan und Deci 2000a). Die extrinsische Motivation führt zu einer Aktivität einer Person, weil sie als dienlich zur Erreichung wertgeschätzter Ergebnisse wahrgenommen wird, die aus der Aktivität erzielt werden. Das bedeutet, sie hat einen extern liegenden Beweggrund. Intrinsische Motivation hingegen führt zu der Ausübung einer Aktivität aus keiner ersichtlichen Stärkung heraus, außer der Ausübung der Aktivität selbst, womit sie selbst Zweck und Belohnung ist. Sie beschreibt demnach einen von innen kommenden Wunsch, eine Handlung durchzuführen, da diese selbst als interessant erlebt wird.

Das Konzept der Motivation überschneidet sich mit dem Interessensbegriff. Nach der Person-Gegenstands-Theorie ist „*Interesse als ein Konstrukt definiert, das die besondere Beziehung einer Person zu einem Gegenstand (Inhalt, Thema, Fachgebiet, Objektbereich usw.) kennzeichnet*“ (Krapp 1992, S 298). Prenzel (1988) beschreibt, dass die Beschäftigung mit einem Gegenstand aus „Interesse“ frei von äußerer Veranlassung stattfindet und sich diese Vorstellung mit dem Konzept der intrinsischen Motivation überschneidet. Auch Krapp (2007) führt die Beziehung der beiden Konstrukte näher aus und beschreibt das Interessenkonzept als inhaltspezifische motivationale Variable der pädagogischen Psychologie. Nach der Person-Gegenstands-Theorie ist die Qualität der intrinsischen Motivation einer der Hauptgründe dafür, eine interessenbezogene Handlung auszuführen.

Auch der sozialkognitiven Lerntheorie liegen u. a. Motivationsprozesse zugrunde. Nach dieser Theorie werden Menschen weder allein von innerer Kraft angetrieben noch allein von externen Stimuli. Stattdessen wird das menschliche Verhalten mit einem Modell von triadischen Wechselwirkungen

erklärt, in dem Verhalten; kognitive, affektive und biologische Faktoren; sowie Umwelteinflüsse gemeinsam als sich gegenseitig beeinflussende Determinanten wirken. Ein für diese Arbeit relevanter regulatorischer Schlüsselmechanismus in dieser dynamischen Beziehung, der das menschliche Verhalten beeinflusst, ist die Selbstwirksamkeit – das Urteil über die eigenen Fähigkeiten zur Ausübung einer gegebenen Aufgabe. Diese Einschätzung ist vor allem für die Ausführung einer Tätigkeit relevant, da sie neben der Motivation maßgeblich einen Prozess anstößt oder nicht (u. a. Bandura 2001).

3.1 Lab Motivation Scale

Für die Untersuchung der Motivation bei Studierenden im Bereich der Laborarbeit entwickelten Dohn et al. (2016) eine „Lab Motivation Scale“. Sie beschreiben, dass es vielfache motivierende Wege gibt für die Ausrichtung des Verhaltens, wenn Studierende in eine Laboraktivität kommen, jeder mit unterschiedlichem Interesse, mit unterschiedlichen Werten und individuellem Vertrauen in die Selbstwirksamkeit. Daher orientierten sich die Autoren an verschiedenen Motivationstheorien und adaptierten Items aus unterschiedlichen validierten Instrumenten. Die entstandene Skala kombiniert zwei theoretische Ansätze der Motivationstheorien:

- 1) Gründe, warum sich Individuen bei unterschiedlichen Aktivitäten engagieren. In diese Theorien schließen die Autoren Konstrukte wie Interesse, intrinsische und extrinsische Motivation mit ein (vgl. Deci 1992; Ryan und Deci 2000a).
“Why should I do this task?” (Dohn et al. 2016, S. 313).
- 2) Der Glaube an die Kompetenz und der erwartete Erfolg (vgl. Bandura 2001).
“Can I do this task?” (Dohn et al. 2016, S. 313).

Die gebildeten und validierten Komponenten umfassen das „situationale Interesse“ („Interest“, INT), die „Bereitschaft zum Engagement“ („Effort“, EFF) und die Zuversicht im Verständnis in Bezug auf den „wahrgenommenen Lernerfolg“ („Self-efficacy“, SE_LE).

„Interest“ wird von Dohn et al. (2016) als Motivationskomponente beschrieben, die sowohl affektive (Gefühle und Werte zu den Inhalten) als auch kognitive (Wahrnehmung der Fähigkeit zur Wissensgenerierung) Komponenten aufweist. Sie umfasst die situative Empfindung und Bewertung in Bezug auf die praktische Arbeit und ist demnach ein inhaltspezifisches Konzept. Interesse ist charakterisiert durch fokussierte Aufmerksamkeit und Engagement. Die Autoren beschreiben, dass die Verbindung zwischen Interesse und Lernen von vielen als selbstverständlich angesehen wird und die Studierenden daher durch größeres Interesse an einem Thema auch eher bereit sind, darüber etwas zu lernen. Die Entwicklung von Interesse kann auf unterschiedlichen Ebenen überprüft werden. Interesse,

welches in erster Linie durch externe Faktoren entsteht, wird als „situationales Interesse“ bezeichnet. Auf der zweiten Ebene bezieht sich das Interesse auf eine dispositionale motivierte Struktur des Individuums (u. a. Krapp und Prenzel 2011). Dohn et al. (2016) differenzieren für ihre Komponente „Interesse“, basierend auf dem Modell von Hidi und Renninger (2006), für das „situationale Interesse“ zusätzlich die Ebene des „aufrechterhaltenen situationalen Interesses“. Sie beschreiben dies als gebundenere, tiefere Form des Interesses, in der Individuen eine bedeutungsvolle Verbindung zu dem Inhalt herstellen und dessen tiefere Bedeutung realisieren würden. „Effort“ gehört nach Dohn et al. (2016) zur extrinsischen Motivation und ist Teil der Selbstbestimmungstheorie (u. a. Deci und Ryan 2000). „Effort“ bezieht sich auf die Bereitschaft, sich in Relation zur wahrgenommenen Bedeutung des Inhalts zu bemühen. In der Arbeit von Dohn et al. (2016) bezieht sich die Bedeutung auf die Lernziele. Sie führen weiter aus, dass Interesse und intrinsische Motivation die Studierenden zwar bereits motivieren könnten, die Bedeutung der Inhalte für die Studierenden nach der *“expectancy value theory”* (basierend auf Wigfield und Eccles 2000) aber ebenfalls eine Rolle spielen. „Self-efficacy“ im Sinne des Lernerfolgs wird von Dohn et al. (2016) als weitere Komponente beschrieben, die den Grad der Motivation der Studierenden bestimmt. Die Selbstwirksamkeit ist definiert als das Urteil einer Person über ihre eigenen Fähigkeiten, Vorgehensweisen zu gestalten und durchzuführen, die zur Erreichung festgelegter Leistungen benötigt sind. Im Kontext der LMS beschreibt sie die Zuversicht, die Inhalte zu verstehen. Je stärker dabei der Glaube in die eigenen Fähigkeiten ist, desto größer und anhaltender sind auch die Bemühungen („Effort“) (Bandura 2001). Dohn et al. (2016) beschreiben die Selbstwirksamkeit als eine zielorientierte Motivation, die aufrechterhalten wird durch eine Ergebniserwartung. Diese Erwartung sei aus motivationaler Perspektive wichtig, da die Studierenden über mögliche Ergebnisse aufgrund unterschiedlicher Handlungen nachdenken. Dementsprechend verhalten sie sich so, dass sie glauben, die Ergebnisse zu erreichen, die sie erreichen wollen. Zusammenfassend stellen Dohn et al. (2016) fest, dass zur Motivierung der Studierenden ihr Interesse ausgelöst und erhalten werden muss. Weiter muss die Instruktion als relevant für ihre persönlichen Werte wahrgenommen werden bzw. als förderlich zur Bewerksstellung gewünschter extrinsischer Ziele, wie etwa das Bestehen des Kurses. Schließlich benötigen die Studierenden eine persönliche Überzeugung davon, dass sie die Fähigkeit besitzen, Erfolg zu haben.

4 Technology Acceptance Model (TAM)

Technologieakzeptanzmodell

Durch die wachsende Abhängigkeit von computergestützten Systemen und die zunehmende Geschwindigkeit bezüglich der Einführung neuer Technologien hat die Benutzerakzeptanz von Technologien auch heute noch eine bedeutende Relevanz. Taherdoost (2018) gibt eine Übersicht der Modelle, die entwickelt wurden, um die Benutzerannahme von neuen Technologien zu erklären. Alle Modelle beschreiben Faktoren, die einen Einfluss auf die Benutzerakzeptanz haben könnten. Den Begriff der „Akzeptanz“ haben beispielsweise Müller-Böling und Müller (1986) definiert und differenziert; ihre etablierte Ausarbeitung kann auf die Benutzerakzeptanz von Technologien angewendet werden. Die Autoren unterscheiden zwischen Einstellungs- und Verhaltensakzeptanz. Die Einstellungsakzeptanz umfasst eine affektive (motivational-emotionale), eine kognitive (Kosten-Nutzen-Rechnung) und eine konative (handlungsorientierte) Komponente. Die Verhaltensakzeptanz begründet sich aus der Verhaltensintention. Von Verhaltensakzeptanz wird aber erst dann gesprochen, wenn Innovationen in Form eines beobachtbaren Verhaltens (z. B. Nutzung) angenommen werden.

Trotz der Vielfalt der Modelle, die die Einflussfaktoren und die Mechanismen der Nutzung von Technologie erklären, dominiert das „Technology Acceptance Model“ die Forschung (Taherdoost 2018). Dies trifft auch auf die Forschung im später gesondert betrachteten Bildungskontext zu (Granić und Marangunić 2019), wie z. B. im E-Learning Bereich (Šumak et al. 2011). Entwickelt wurde das TAM ursprünglich von Davis (1985) im Rahmen seiner Dissertation, als sich Computer und erste Software in der Arbeitswelt immer mehr etablierten und dadurch ein wachsender Bedarf entstand, die Gründe zur Annahme oder Ablehnung von Technologien zu verstehen. In der ursprünglichen Arbeit untersuchte Davis diesbezüglich ein E-Mail- und ein Textverarbeitungsprogramm. Die theoretische Grundlage des Modells beruht auf der sozialpsychologischen Theorie der überlegten Handlung (*Theory of reasoned action*), welche ein Modell zur Vorhersage von Verhalten beschreibt, das im Zusammenhang mit der Einstellung steht (Ajzen und Fishbein 1980). Für das TAM wurden aber weitere Erkenntnisse aus vielfältigen Bereichen beachtet und zusammengeführt: Einstellungsforschung zu Management Informationssystemen, Laborforschung zu Management Informationssystemen, Mensch-Computer Interaktionsforschung sowie Aspekte der Psychologie zu Einstellungen (Davis 1987).

Später veröffentlichten Davis (1989) und Davis et al. (1989) das TAM mit dem Ziel der Etablierung des theoretischen Modells zur Erklärung der Benutzerakzeptanz und ihrer Prozesse bezüglich computerbasierter Informationssysteme. Das entstandene Modell ist kausalanalytisch und erklärt den Einfluss

von Eigenschaften eines computerbasierten Informationssystems und weiteren Prädiktorvariablen auf die Benutzerakzeptanz. Genauer erklärt es die tatsächliche Nutzung eines Technologiesystems direkt oder indirekt durch die „Nutzungseinstellung“, die „Nutzungsabsicht“, die „wahrgenommene Nützlichkeit“ und die „wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“ eines Systems (Davis 1989). Dabei stellen die „wahrgenommene Nützlichkeit“ und die „wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“ die Prädiktor-Kernkomponenten dar. Sie sind wie folgt definiert (u. a. Davis 1989; Venkatesh und Bala 2008):

- 1) **Wahrgenommene Nützlichkeit** („Perceived Usefulness“, PU) ist der Grad, zu dem jemand glaubt, dass die Benutzung eines bestimmten Systems seine Arbeitsperformance bzw. Jobleistung verbessern wird.
- 2) **Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit** („Perceived Ease of Use“, PEOU) ist der Grad, zu dem jemand glaubt, dass die Benutzung eines bestimmten Systems frei von physischen und mentalen Bemühungen und Anstrengungen ist.

In diesem Kontext bedeutet „frei von Bemühungen“ die Abwesenheit von Schwierigkeiten oder großen Anstrengungen, wie Davis (1989) in seiner Arbeit spezifiziert. PEOU bezieht sich demnach auf die Einschätzung einer Person bezüglich der Bemühungen, die es zur Benutzung einer Technologie benötigt und korreliert eng mit dem Vertrauen in die eigene Kompetenz (Scherer et al. 2019). Zur Bestimmung des Einflusses der Kernkomponenten auf die Akzeptanz eines Systems werden zusätzlich die „Nutzungseinstellung“ zu einem System (Attitude Toward Using) und als Ausgangsvariablen die „Nutzungsabsicht“ (Behavioral Intention) und/oder die „tatsächliche Benutzung“ des Systems (Actual System Use) erhoben (Davis 1989; Scherer et al. 2019). Die Benutzerakzeptanz oder Ablehnung gegenüber einer Computertechnologie soll demnach über die Messung der „Nutzungsabsicht“ vorhergesagt werden und diese Intention ihrerseits über die „Nutzungseinstellung“, die „wahrgenommene Nützlichkeit“, die „wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“ und weitere vermittelnde Effekte auf PU und PEOU (externe Variablen) (Davis 1989) (**Abbildung 5**). Da der angenommene Zusammenhang zwischen der „Nutzungseinstellung“ und der „Nutzungsabsicht“ zurückgewiesen werden musste (Davis et al. 1989), wurde diese Einflussvariable in späteren Arbeiten nicht mehr berücksichtigt, sondern PU und PEOU wurden als direkte Einflussvariablen auf die „Nutzungsabsicht“ angenommen.

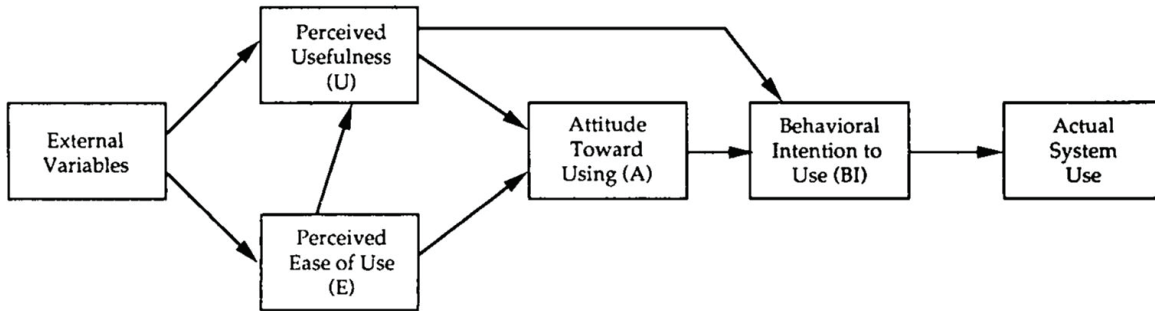


Abbildung 5: Das Technology Acceptance Model (Davis et al. 1989, S. 985).

PU beeinflusst die „Nutzungsabsicht“ in den meisten Arbeiten mehr als PEOU; so wird die „Benutzerfreundlichkeit“ auch als kausaler Vorläufer der „Nützlichkeit“ beschrieben, mit indirekter Wirkung auf die Benutzerakzeptanz über einen Einfluss auf die „Nützlichkeit“, da ein System als nützlicher angesehen wird, wenn es freier von Anstrengungen ist (Davis 1987, 1989; Davis et al. 1989; Venkatesh und Davis 2000). In anderen Worten: je einfacher die Benutzung einer Technologie oder je nützlicher eine bestimmte Technologie empfunden wird, desto wahrscheinlicher beabsichtigt der Benutzer, eine Technologie erneut zu verwenden (Ritter 2017).

Die Stärke des Modells wird von zahlreichen Studien bestätigt, was auch die breite Anwendbarkeit für diverse Technologien und Endbenutzer zeigt (Venkatesh et al. 2003). Begründet liegt dies in der Verständlichkeit, der Simplizität und der hohen Reliabilität der Einflussvariablen, wie King und He (2006) in ihrer Metaanalyse aufzeigen. Durch die allgemeinen anpassbaren Formulierungen kann es außerdem auf jegliche Software übertragen werden. Durch die Generalisierbarkeit können Ergebnisse unterschiedlichster TAM-Studien miteinander verglichen werden.

Im Laufe der Zeit wurde das TAM immer weiter entwickelt, erweitert und angepasst, wobei häufig die Inkludierung neuer erklärender Variablen angestrebt wurde und postulierte Relationen überprüft wurden. Je nach Publikation erklärt das Modell in der Regel rund 40–50 % – manchmal sogar mehr – der Varianz des Benutzerverhaltens bzw. der „Nutzungsabsicht“ (Davis 1989; Park 2009; Venkatesh und Bala 2008).

Postulierte Kern-Modelle sind:

- Technology Acceptance Model 2 (**TAM2**),
nach Venkatesh und Davis (2000);
- Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (**UTAUT**),
nach Venkatesh et al. (2003);
- Technology Acceptance Model 3 (**TAM3**),
nach Venkatesh und Bala (2008);
- Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (**UTAUT2**),
nach Venkatesh et al. (2012).

Das erweiterte Modell „TAM2“ von Venkatesh und Davis (2000) implementiert beispielsweise in das originale Modell zwei neue Konstrukt-Gruppen, um die Vorhersagestärke der „wahrgenommenen Nützlichkeit“ und der „Nutzungsabsicht“ zu verbessern (Venkatesh und Davis 2000):

- 1) soziale Einflüsse (subjektive Norm, Image, Freiwilligkeit, Erfahrung);
- 2) kognitiv förderliche Prozesse (Job Relevanz, Ausgabe Qualität, Ergebnisklarheit).

Die Ergebnisse der TAM2 Studie unterstützen die Theorie des angepassten Modells stark und die angepasste Version erklärt 60 % der Benutzerakzeptanz (Venkatesh und Davis 2000). In anderen Arbeiten wird ein Einfluss der intrinsischen Motivation beachtet und dazu werden Komponenten zur „Freude“ in das Modell implementiert. Nach den Motivationstheorien (vgl. Kapitel 3) wirken die „wahrgenommene Nützlichkeit“ und in einigen Arbeiten auch die „Benutzerfreundlichkeit“ als ein Beispiel für extrinsische Motivation und die „wahrgenommene Freude“ als Beispiel für intrinsische Motivation (u. a. Davis et al. 1992; Lee et al. 2005; Venkatesh et al. 2002). Die extrinsische Motivation bezieht sich in diesem Kontext auf die Durchführung einer Aktivität, da sie von dem Benutzer als dienlich zum Erreichen von gewünschten Ergebnissen wahrgenommen wird, die eindeutig mit der Aktivität selbst verknüpft werden, wie eine Verbesserung der Arbeitsperformance, Bezahlung oder Beförderung (Davis et al. 1992). Die intrinsische Motivation bezieht sich in diesem Kontext auf die Durchführung einer Aktivität aus keiner anderen ersichtlichen Verstärkung außer dem Prozess der Durchführung der Aktivität selbst. Demnach ist die „wahrgenommene Freude“ („Perceived Enjoyment“, PE) definiert als der Grad, zu dem eine Aktivität unter Verwendung eines Computersystems als erfreulich oder angenehm für sich selbst wahrgenommen wird, unabhängig von Konsequenzen, die erwartet werden könnten (Davis et al. 1992; Lee et al. 2005; Yi und Hwang 2003).

In der Arbeit von Davis et al. (1992) zeigt sich beispielsweise ein signifikanter Einfluss von PE auf die „Nutzungsabsicht“, außerdem reguliert sie die „wahrgenommene Nützlichkeit“. So erklären die Komponenten PE und PU in dieser Arbeit zusammen 62–75 % der Varianz der „Nutzungsabsicht“. Zur Klärung, ob Computer wegen der „wahrgenommenen Nützlichkeit“ oder „Freude“ verwendet werden, zeigen Davis et al. (1992), dass die „Nutzungsabsicht“ überwiegend von der „Nützlichkeit“ zur Verbesserung der Arbeitsperformance beeinflusst wird und an zweiter Stelle von der „Freude“, die während der Benutzung des Computers an sich empfunden wird. So wurden immer wieder neue Einflussvariablen implementiert und getestet, um das Modell je nach Einsatz zu verbessern, wobei die Kernkomponenten PU und PEOU immer fester Bestandteil geblieben sind und die Basis bilden. Eine gute Übersicht über die Entwicklung des Modells und die jeweiligen Erklärungsstärken bieten dazu u. a. Legris et al. (2003).

Relevant für die vorliegende Arbeit ist noch die Variable der Computerselbstwirksamkeit („Computer Self-Efficacy“, PC_SE; u. a. Venkatesh 2000; Venkatesh und Bala 2008; Yi und Hwang 2003). Selbstwirksamkeit bezieht sich auf die individuelle Einschätzung der eigenen Möglichkeiten zur Durchführung einer spezifischen Aufgabe (Bandura 1982). Im IT Benutzerkontext ist Computerselbstwirksamkeit demnach definiert als der Grad, zu dem jemand glaubt, dass er oder sie eine spezifische Aufgabe unter Verwendung eines Computers durchführen kann (Venkatesh und Bala 2008).

Die bereits erwähnte beachtliche Bedeutung des Modells und die mögliche Erklärung des Nutzerverhaltens über eine große Bandbreite von (Endnutzer-) Computertechnologien und Benutzerpopulationen wird zum Beispiel in der Arbeit von Granić und Marangunić (2019) aufgeführt. Für die vorliegende Arbeit ist der Einsatz im Bildungskontext relevant, der im folgenden Kapitel betrachtet wird.

4.1 Das TAM im Bildungskontext

Auch im Bildungskontext ist die steigende Einbindung von Technologien präsent und die Identifizierung der Faktoren, welche die Benutzerakzeptanz erklären, ein wichtiges Thema (Granić und Marangunić 2019). Im Handlungskonzept der Kultusministerkonferenz findet sich dazu das formulierte Ziel: *„Die Länder beziehen in ihren Lehr- und Bildungsplänen sowie Rahmenplänen, beginnend mit der Primarschule, die Kompetenzen ein, die für eine aktive, selbstbestimmte Teilhabe in einer digitalen Welt erforderlich sind“* (Sekretariat der Kultusministerkonferenz 2017, S. 12). *„Für den Kompetenzrahmen [...] wurde der Begriff ‚Kompetenzen in der digitalen Welt‘ gewählt“* (Sekretariat der Kultusministerkonferenz 2017, S. 15). Darauf aufbauend bedeutet das auch, *„dass Lehrkräfte digitale*

Medien in ihrem jeweiligen Fachunterricht professionell und didaktisch sinnvoll nutzen sowie gemäß dem Bildungs- und Erziehungsauftrag inhaltlich reflektieren können“ (Sekretariat der Kultusministerkonferenz 2017, S. 25). Die steigende Forderung nach E-Learning und Technologien im Lernkontext sowie deren sinnvolle Einbindung in die Lehre impliziert auch ein wachsendes Verständnis für die Voraussetzungen und Variablen, welche die Akzeptanz der Lernenden zu diesen Tools beeinflussen, damit der Einsatz entsprechend differenziert bewertet werden kann.

Granić und Marangunić (2019) haben ein aktuelles Review zum Einsatz des TAM im Bildungskontext veröffentlicht. Das Review bietet einen Überblick bezüglich des aktuellen Stands der Forschungsbemühungen zum TAM im Lehr-Lern-Umfeld für eine Vielfalt von Lerndomänen, Lerntechnologien und Benutzertypen. Die Hauptergebnisse deuten darauf hin, dass das TAM und die vielen unterschiedlichen Versionen ein glaubwürdiges Modell für eine erleichterte Beurteilung von diversen Lerntechnologien repräsentieren. PEOU und PU als Kernvariablen des TAM zeigen einen nachweislichen Einfluss auf die Akzeptanz für das Lernen mit Technologien. In den Arbeiten von Estriegana et al. (2019) sowie Granić und Marangunić (2019) wird die Bandbreite des Einsatzbereichs für das TAM im Bildungskontext zusammengefasst: z. B. Learning-Management-Systeme, integrierte E-Learning Systeme, virtuelle Lernumgebungen, aber auch neuere Technologien wie YouTube oder mobile Technologien. Granić und Marangunić (2019) analysieren außerdem die unterschiedlichen Stichproben der 71 im Review untersuchten Studien (**Abbildung 6**).

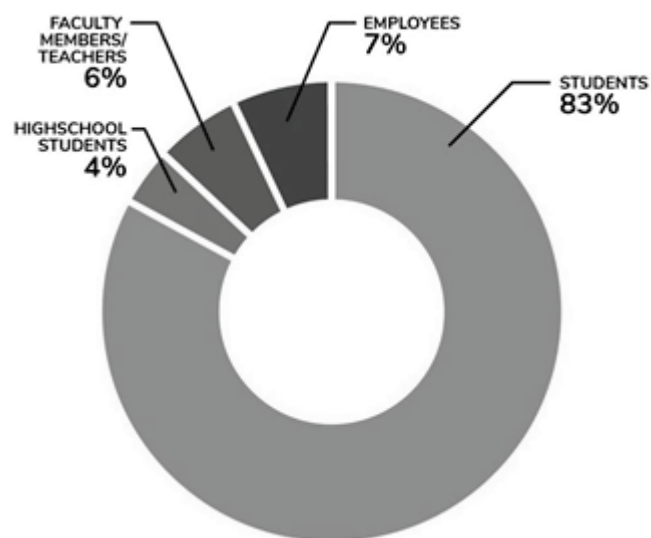


Abbildung 6: Die Stichproben Kategorien für Analysen mit dem TAM im Bildungskontext (Granić und Marangunić 2019, S. 11).

In den meisten Untersuchungen (83 %) bilden Studierende die Stichprobe. Untersuchungen mit Schülern (*Highschoolstudents*), wie sie in der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden, fanden sich nur bei 4 % der Studien. Dies betrifft zum einen die Arbeit von Liu et al. (2010), die in Taiwan den Einsatz einer Online Lern-Community zum Englisch Lernen untersucht haben, zum anderen die Arbeit von Kiliç et al. (2015), in deren Studie untersucht wurde, welche Faktoren die Intention von Schülern (Highschool) zur Verwendung eines Whiteboards beeinflussen.

Die quantitative Metaanalyse von Abdullah und Ward (2016) und die Metaanalyse bezüglich der kausalen Effektgrößen der Beziehungen im TAM von Šumak et al. (2011) konzentrieren sich auf den Bereich des E-Learning, in dem das TAM ebenfalls das Feld der Akzeptanzstudien dominiert. Šumak et al. (2011) zeigen, dass in 86 % der Fälle das TAM im Original oder erweitert in der E-Learning Akzeptanzforschung benutzt wird. Sie erklären, dass die Größe der kausalen Effekte zwischen individuellen TAM-bezogenen Faktoren von dem Typ der Benutzung und dem Typ der E-Learning Technologie abhängt. In vielen Arbeiten wird die Anwendbarkeit des TAM im E-Learning Kontext bestätigt und sie zeigen, dass das Modell als gutes theoretisches Konstrukt für das Verständnis der Benutzerakzeptanz in diesem Umfeld funktioniert (u. a. Diwakar et al. 2014; Estriegana et al. 2019; Lee et al. 2005; Park 2009; Yi und Hwang 2003). Beispielhaft wird die für die vorliegende Arbeit relevante Studie von Diwakar et al. (2014) angeführt. Sie untersuchten mit dem TAM eine virtuelle neurobiologische Lernumgebung (vgl. Kapitel 2.3.1) und setzten dazu neben den Kernkomponenten PU und PEOU auch eine neue Komponente ein, den jeweiligen Nutzen/Vorteil (Relative Advantage). Er wird definiert als der Grad, zu dem etwas als besser wahrgenommen wird als das, was es verdrängt. Die Konsistenz der Komponenten erreicht in diesem Kontext ein gutes Cronbachs-Alpha-Maß (größer 0,85) und zeigt, dass das TAM auch in diesem spezifischen neurobiologisch-virtuellen Laborkontext als Modell zur Erklärung der Benutzerakzeptanz einen sinnvollen Einsatz findet.

Abdullah und Ward (2016) untersuchten in ihrer Metaanalyse, welche externen Komponenten des TAM im Kontext des E-Learning am gebräuchlichsten sind (**Abbildung 7**). Die Ergebnisse zeigen, dass „Self-Efficacy“, „Subjective Norms“, „Enjoyment“, „Computer Anxiety“ und „Experience“ die am häufigsten verwendeten externen Komponenten des TAM sind.

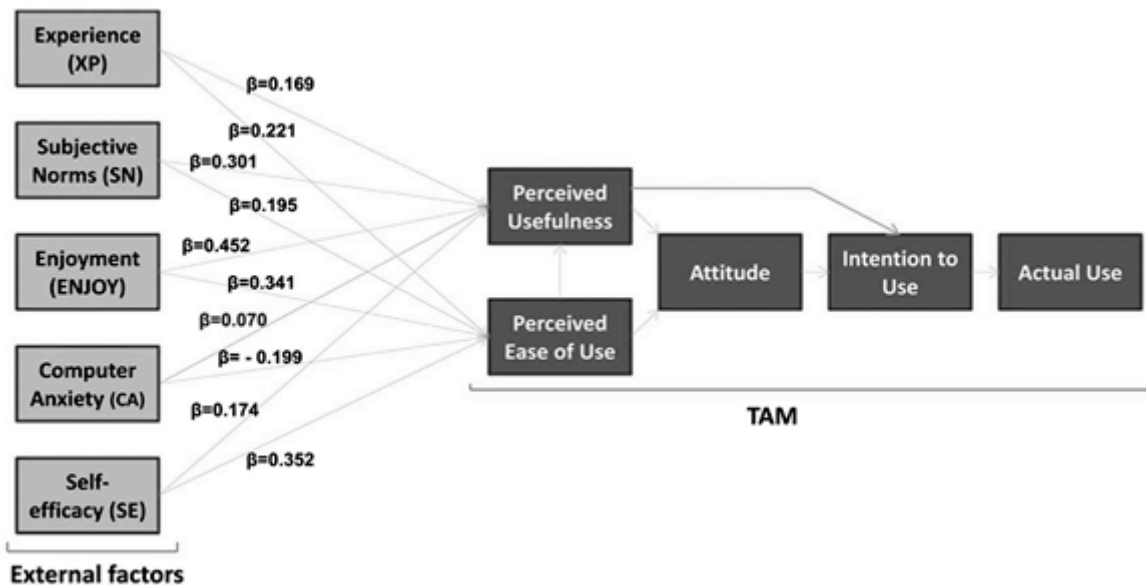


Abbildung 7: Das General Extended Technology Acceptance Model for E-Learning (GETAMEL) (Abdullah und Ward 2016, S. 246).

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass der beste Prädiktor von PEOU bei Studierenden die „E-Learning Self-efficacy“ ist, gefolgt von „Enjoyment“, „Experience“, „Computer Anxiety“ und „Subjective Norms“. Der beste Prädiktor von PU bei Studierenden für E-Learning Systeme ist „Enjoyment“, gefolgt von „Subjective Norms“, „Self-efficacy“ und „Experience“. PU wird in diesem Kontext definiert als der Grad, zu dem ein Lernender glaubt, dass die Benutzung der E-Learning Umgebung das Lernen verbessern wird; während PEOU den Grad beschreibt, zu dem der Lernende die Benutzung der E-Learning Umgebung als frei von kognitiven Bemühungen empfindet (Park 2009).

Granić und Marangunić (2019) zeigen für den Bildungskontext ebenfalls, dass die Selbstwirksamkeit eine häufige Einflussvariable auf die Komponente PEOU bildet und dass beide Variablen wesentliche Komponenten für die „Nutzungsabsicht“ von E-Learning darstellen. Des Weiteren zeigen die Autoren wie auch Abdullah und Ward (2016), dass viele Arbeiten einen Einfluss von PE auf die Effektivität eines E-Learning Systems feststellen. PU bildet den stärksten Prädiktor für die Annahme diverser Technologien im Bildungskontext. Daneben spielt außerdem die Zufriedenstellung (Satisfaction) eine Rolle für eine positive „Nutzungsabsicht“. Granić und Marangunić (2019) fassen zusammen, dass wir in einer Zeit fortschrittlicher Technik leben und das Bildungswesen ein gutes Potenzial für die Einbindung von neuen Technologien bietet. Die Lerntechnologien sollen den Prozess des Wissenstransfers und -erwerbs unterstützen. Daher sei die Forschung der Technologieakzeptanz im Lehr-Lern-Bereich ein attraktiver Trend. Das TAM und seine Versionen sind dazu ein weltweit anerkanntes solides Gerüst zur Planung und Ausführung der empirischen Forschung im Bereich der Bildung.

Methoden

5 Das „Schülerlabor Neurowissenschaften“

Um Schülern die Möglichkeit zu geben, sich praktisch-experimentell mit dem Themenfeld der Neurobiologie auseinanderzusetzen, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Schülerlabortage auf dem Feld der Neurowissenschaften konzipiert und mit vielfältigen Erhebungen wissenschaftlich begleitet. Das „Schülerlabor Neurowissenschaften“ ist in Kooperation mit der Gemeinnützigen Hertie-Stiftung entstanden und in der Abteilung für Didaktik der Biowissenschaften an der Goethe-Universität Frankfurt angesiedelt. Basierend auf dem Ansatz, die Themen der Neurowissenschaften in Schulen zielgerichtet zu stärken, wurden die Konzepte für verschiedene Jahrgangs- und Altersstufen schülerorientiert umgesetzt und neurowissenschaftliche Forschung durch den eigenen Umgang mit modernen Forschungsapparaturen erfahrbar gemacht.

5.1 Konzeption des Schülerlabors

Zur Planung von Angeboten im Bereich der Neurowissenschaften wurde zunächst anhand der Hessischen Lehrpläne und Kerncurricula untersucht, in welchen Bereichen der biologischen Schulinhalte eine Vermittlung von neurobiologischen Inhalten Raum finden kann. Durch diese Orientierung soll eine Einbindung in Unterrichtsabläufe für die Lehrkräfte ermöglicht werden. Da die Neurobiologie in der Sekundarstufe II ihren Vermittlungsschwerpunkt hat (Hessisches Kultusministerium 2016), wurde dort der Schwerpunkt gelegt und neben zwei Angeboten zur Elektrophysiologie auch das Themenfeld der Verhaltensbiologie mit abgedeckt. In der Mittelstufe werden – orientiert an den Curricula – schwerpunktmäßig die Sinnessysteme durchgenommen (Hessisches Kultusministerium o. J.). Obligatorisch hat die Lehrkraft hier die Wahl, sich exemplarisch entweder für das Auge oder das Ohr als Schwerpunkt zu entscheiden. Ausgehend von der beliebteren Schwerpunktsetzung zur Thematik des Auges wurde ein SLT zur visuellen Wahrnehmung mit neurobiologischer Ausrichtung konzipiert. Aber auch für die ganz jungen Schüler sollte im Schülerlabor ein erster Zugang zur Neurobiologie geschaffen werden. Für die Jahrgangsstufen 5–8 wurde dazu in Anlehnung an die Lehrpläne (Hessisches Kultusministerium o. J.) am Themenfeld der Mikroskopie angesetzt. Dazu wurden zwei Konzeptionen entwickelt, die neurobiologisches Gewebe und neurobiologische Sinnessysteme thematisch passend und für das Alter der Schüler aufgearbeitet anbieten.

Während der konzeptionellen Phase der SLT wurden mehrfach Probedurchläufe mit ausgewählten Klassen durchgeführt. Der Konzeptionsansatz wurde während der gesamten Durchführung kritisch betrachtet und abschließende Gesprächsrunden mit den Schülern ermöglichten ein aussagekräftiges Feedback. Zusätzlich wurde für die konzeptionelle Phase ein speziell erarbeiteter Feedback-Fragebogen eingesetzt und zeitnah ausgewertet, um eventuelle Korrekturen an den Konzeptionen anhand der Rückmeldungen und Bedürfnisse der Schüler vorzunehmen. Begutachtet wurden das Zeitmanagement, die Versuchsauswahl, die Durchführbarkeit, Verständnisprobleme bei den Schülern, die entwickelten Arbeitszettel, die Betreuung, aber auch die Freude der Schüler an den Versuchen und dem SLT insgesamt. Nach mehrmaligen Probedurchläufen und den daraus resultierenden Überarbeitungen der Konzeptionen entstanden sechs SLT, deren finale Konzeptionen im Folgenden näher beschrieben werden.

5.2 Konzepte der Schülerlabortage

Die drei Konzepte für die **Sekundarstufe I** wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht wissenschaftlich begleitet, gehören aber zum Gesamtkonzept des entwickelten „Schülerlabors Neurowissenschaften“ und werden daher an dieser Stelle dennoch kurz vorgestellt.

Für die Jahrgangsstufen 5–8 lag der Anknüpfungspunkt beim Themenfeld der Mikroskopie, um bereits hier erste Berührungspunkte zur Neurobiologie zu ermöglichen. Neben der Vermittlung von mikroskopischen Dimensionen und modernen mikroskopischen Verfahren wird am Beispiel der Zweifleckgrille auch ein Einblick in Sinnessysteme ermöglicht (**SLT „Kleine Dinge ganz groß“**). Die Schüler setzen sich an diesem Tag mit den Stridulations- und Hörorganen der Zweifleckgrillen (*Gryllus bimaculatus*) vom makroskopischen Bereich bis hin in den Bereich der Rasterelektronenmikroskopie auseinander.

Titel: Kleine Dinge ganz groß

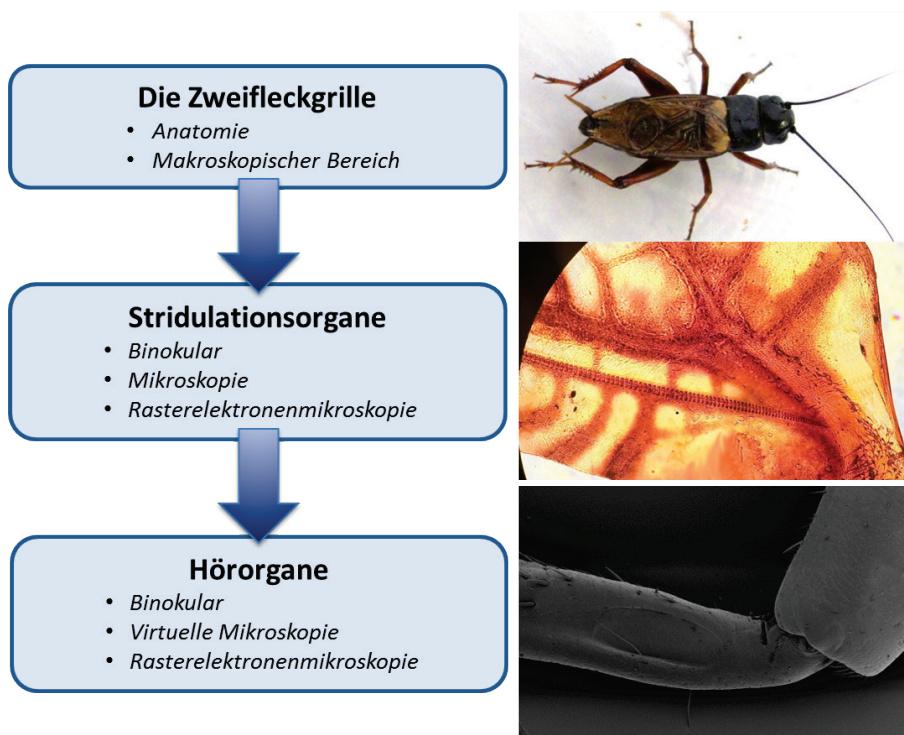
Thema: Sinnesorgane von Insekten in verschiedenen Dimensionen

Zielgruppe: Jahrgangsstufe 5–8

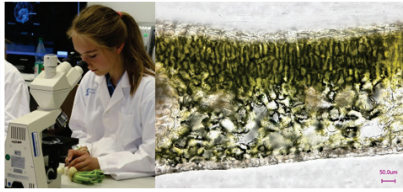
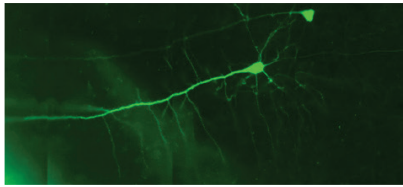
Voraussetzungen: Die Handhabung von Lichtmikroskopen sollte vertraut sein. Vorkenntnisse sind nicht notwendig, können aber berücksichtigt werden.

Lernziele: Ableiten verschiedener Größenordnungen durch das Anwenden unterschiedlicher mikroskopischer Techniken; Erfassen des strukturellen Aufbaus von Sinnesorganen in der Insektenwelt; Erkennen des Zusammenhangs zwischen biologischen Strukturen und deren Funktion.

Programm:



Ein weiteres Laborkonzept für die Altersgruppe vermittelt die Vielfalt von Zellen und zeigt neben der Betrachtung von Pflanzenzellen auch die tierischen Zellen bis hin zur besonderen Struktur und Funktion von Nervenzellen auf (SLT „Von der Vielfalt der Zellen“). Der SLT ermöglicht den Schülern, neben der klassischen Mikroskopie auch die virtuelle Mikroskopie kennen zu lernen (Greßler et al. 2017).

Titel:	Von der Vielfalt der Zellen
Thema:	Differenzierung von Zell- und Gewebetypen mit verschiedenen mikroskopischen Verfahren
Zielgruppe:	Jahrgangsstufe 5–8
Voraussetzungen:	Die Handhabung von Lichtmikroskopen sollte vertraut sein. Thematisch sind Vorkenntnisse zur Grundstruktur von Tier- und Pflanzenzellen notwendig.
Lernziele:	Beschreiben von Zellen und ihrer Struktur als Grundbausteine von Lebewesen; Einordnen verschiedener Präparate in Organisationsstufen; Anwenden des Lichtmikroskops als biologisches Arbeitsgerät; Differenzieren von Tier- und Pflanzenzellen; Differenzieren von Zelltypen in unterschiedlichen Strukturen in Verbindung mit ihrer Funktion.
Programm:	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid blue; border-radius: 15px; padding: 10px; width: 80%; background-color: #e6f2ff;"> <p style="text-align: center;">Pflanzenzellen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grundaufbau • Blattquerschnitt Kirschlorbeer • Klassische Mikroskopie • Organisationsstufen </div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid blue; border-radius: 15px; padding: 10px; width: 80%; background-color: #e6f2ff;"> <p style="text-align: center;">Tierzellen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grundaufbau • Tierisches Gewebe • Nervenzellen • Virtuelle Mikroskopie </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;">   </div>

Für die Schüler ab Jahrgangsstufe 9 wurde ein SLT zur visuellen Wahrnehmung konzipiert und angeboten (SLT „Ich sehe was, was du nicht siehst“). Aufbauend auf den Schulinhalten beschäftigen sich die Schüler vertiefend mit der visuellen Wahrnehmung und deren Verarbeitung. Neben vielfältiger Stationsarbeit kommt auch die moderne Eyetracking-Technik zum Einsatz. Die Schüler zeichnen ihre eigenen Blickverläufe zu vielfältigen Themen auf. Die Wahrnehmungsprozesse werden anschließend visualisiert und von den Schülern ausgewertet.

Titel: Ich sehe was, was du nicht siehst

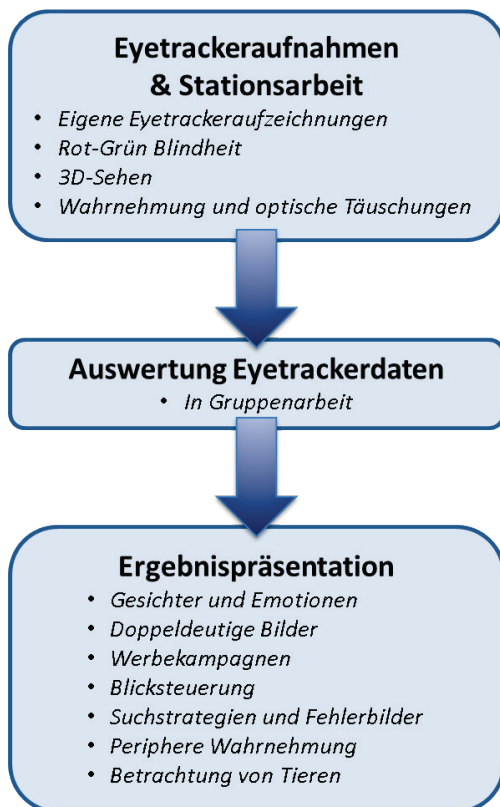
Thema: Visuelle Wahrnehmung und Verarbeitung sowie Studien mit Eyetrackern

Zielgruppe: Ab Jahrgangsstufe 9

Voraussetzungen: Die Schüler sollten ein Grundlagenwissen zu Bau und Funktion des Auges und im Speziellen zum Aufbau der Netzhaut haben.

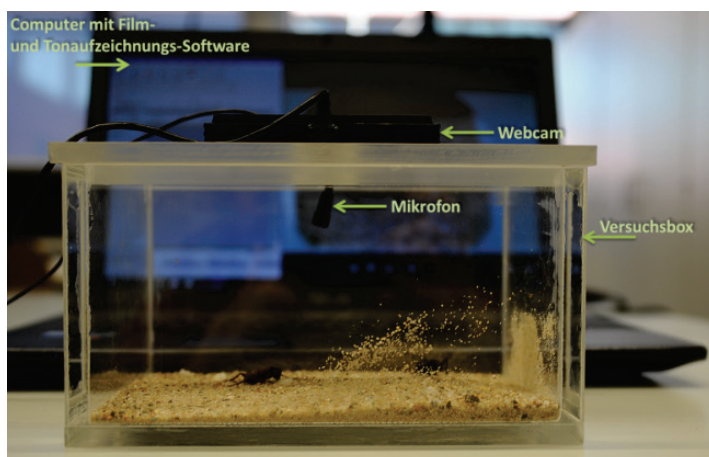
Lernziele: Anwenden des Weges wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung: Dokumentieren von Wahrnehmungsprozessen mit Hilfe der Eyetracking-Technik im Selbstversuch; Darstellen, Auswerten und Einordnen eigener Versuchsergebnisse.

Programm:



Die drei SLT für die **Sekundarstufe II** wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit wissenschaftlich begleitet. Ausgehend von dem Vermittlungsschwerpunkt der Neurobiologie wurden für die Sekundarstufe II insgesamt drei Angebote umgesetzt, deren Konzeptionen im Folgenden im Detail beschrieben werden.

Als Teildisziplin der Neurowissenschaften wird in der Qualifikationsphase 3 der gymnasialen Oberstufe (Hessisches Curriculum) auch die Verhaltensbiologie behandelt. Dabei steht das Lebewesen als ganzer Organismus im Fokus und die Lernenden sollen Verhalten auf der Grundlage der zuvor erarbeiteten neurobiologischen Inhalte mit wissenschaftlichen Erklärungsmodellen beschreiben und interpretieren. Dazu wird das Verhalten ausgehend von der proximalen und ultimativen Ebene betrachtet und im Zusammenhang mit angeborenen Elementen, Beeinflussung durch endogene und exogene Faktoren sowie verschiedenen Lernformen analysiert (Hessisches Kultusministerium 2016). Am Beispiel der Zweifleckgrille (*Gryllus bimaculatus*) eignen sich die Schüler am **SLT „Wir sind Verhaltensforscher“** die Zusammenhänge des Basiskonzepts „Struktur und Funktion“ (Hessisches Kultusministerium 2016) an. Dazu erarbeiten sie zunächst die Strukturen der Stridulations- und Hörorgane der Zweifleckgrille. Anschließend wird in Verhaltensstudien der Zusammenhang mit den Funktionsweisen hergestellt. Die Verhaltensstudien werden von den Schülern in Kleingruppen anhand von Leitfragen selbstständig geplant, durchgeführt, dokumentiert und ausgewertet. Dazu arbeiten sie mit klassischen Methoden wie z. B. der Protokollierung und der Erstellung eines Ethogramms. Zusätzlich werden aber auch mediale Methoden zur Film- und Tonaufzeichnung eingesetzt. Hierfür wurde eine Versuchsbox entwickelt, in der die Tiere beobachtet werden können, während gleichzeitig über angebrachte Webcams und Mikrofone die Film- und Tonaufzeichnungen umgesetzt werden können (**Abbildung 8**). Jede Gruppe erhält einen eigenen Studienschwerpunkt aus dem Repertoire des Revier- und Balzverhaltens der Tiere. So erfahren die Schüler die Verhaltensbiologie aus der Sicht eines Verhaltensbiologen – die Arbeit am lebenden Objekt und die Erfassung der Daten. Zur Ergebnissicherung wird ausgehend von den Aufzeichnungen ein kurzer Film erstellt, der den Fokus auf die Leitfragen der eigenen Gruppe legen soll. Abschließend präsentieren die Gruppen ihre



Ergebnisse im Plenum, wobei explizit auf eine wissenschaftliche Beschreibung der beobachteten Verhaltensweisen hingearbeitet wird.

Abbildung 8: Medialer Versuchsaufbau zu den Verhaltensstudien mit der Zweifleckgrille.

Im Deckel der Versuchsbox befinden sich Aussparungen für die Anbringung eines Mikrofons und der Webcam.

Titel: Wir sind Verhaltensforscher

Thema: Die Verhaltensbiologie der Zweifleckgrille durch eigene Studien erforschen

Zielgruppe: Sekundarstufe II

Voraussetzungen: Es werden keine inhaltlichen Vorkenntnisse bei den Schülern benötigt. In der Vermittlung des benötigten Basiswissens zu Begriffen der Ethologie kann vorhandenes Wissen berücksichtigt werden.

Lernziele: Planen und Durchführen eigener Verhaltensstudien; Auswerten von Ethogrammen; Erfassen des strukturellen Aufbaus der Hör- und Gesangsorgane von *Gryllus bimaculatus*; Erkennen des Zusammenhangs zwischen biologischen Strukturen und deren Funktion; Analysieren und Vergleichen der Grillengesänge mit Hilfe von Sonagrammen.

Programm:



Die Neurobiologie soll „Erklärungen und modellhafte Veranschaulichungen für das Verständnis komplexer Verhaltensweisen und deren Veränderung auf physiologischer Ebene“ (Hessisches Kultusministerium 2016, S. 36) liefern. Das zweite Konzept (SLT „**Neuro?Logisch! – Summenpotenziale**“) knüpft daran an und untersucht, welche elektrophysiologischen Vorgänge ausgehend von den Nervenzellen auf Organebene entstehen, wie diese moduliert und wie abgeleitete Summenpotenziale interpretiert werden können. Grundlegend für das Verständnis sind die Inhalte des Themenfelds Q3.1 zur Neurobiologie („*Bau und Funktion der Nervenzelle: Ruhepotenzial, Aktionspotenzial, Erregungsleitung, Transmitterwirkung am Beispiel Acetylcholin-führender Synapsen, ligandenabhängige und spannungsabhängige Kanäle, Stoffeinwirkung an Acetylcholin-führenden Synapsen an einem Beispiel (z. B. Medikamente, Gifte, Drogen, Alkohol)*“; Hessisches Kultusministerium 2016, S. 37). Außerdem wird auf die Kenntnisse der Sekundarstufe I zu den Themenfeldern „Biologische Strukturen und ihre Funktionen“ und „Funktionseinteilung im Organismus“ (Hessisches Kultusministerium o. J.) zurückgegriffen. Die morphologischen Grundlagen der Organe Muskel, Herz und Gehirn werden mit ihren elektrophysiologischen Eigenschaften in Verbindung gesetzt, indem die Schüler von sich selbst EMG- und EKG-Messungen erstellen, auswerten und interpretieren (Schülerversuche Elektrophysiologie, Phywe Systeme GmbH & Co. KG). In diesem Zusammenhang wird außerdem eine EEG-Messung als Demonstrationsversuch vorgestellt und erläutert (EMOTIV EPOC+ 14 Channel Mobile EEG). So erweitern die Schüler an diesem SLT ihre Kenntnisse zur Funktionalität des eigenen Körpers. Sie erfahren anhand der EMG-Messungen, welche elektrophysiologischen Vorgänge an der Postsynapse der muskulären Endplatte durch die Transmitterwirkung des Acetylcholins ausgelöst werden. Zudem wird am Beispiel des Herzens die Funktionsweise von elektrischen Synapsen verdeutlicht und die Funktionsanpassung der Ionenkanäle in den Herzzellen (Aktionspotenziale der Schrittmacherzellen im Vergleich zu den Herzmuskelzellen) aufgezeigt. Der EEG Demonstrationsversuch ermöglicht den Schülern einen Einblick in das Wahlthemenfeld Q3.4 zum „Gehirnaufbau und seiner Funktion beim Menschen“.

Titel: Neuro?Logisch! – Summenpotenziale

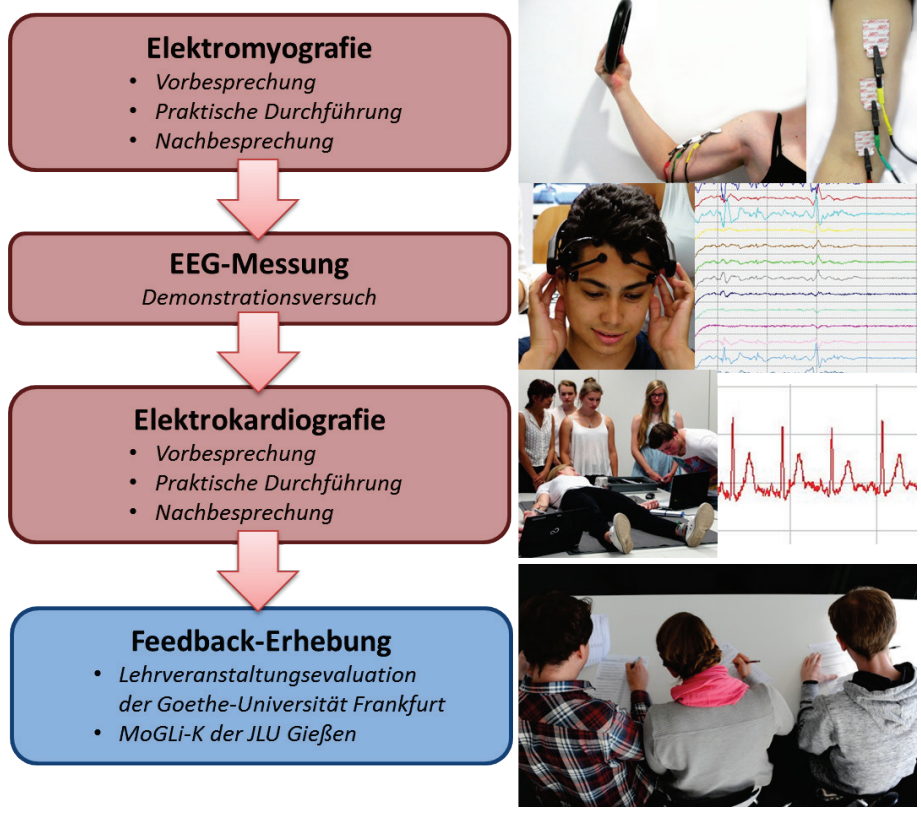
Thema: Elektrophysiologische Messungen am Menschen (EKG, EMG & EEG)

Zielgruppe: Sekundarstufe II

Voraussetzungen: Grundlagen der Elektrophysiologie müssen bekannt sein. Diese beinhalten den Aufbau von Nervenzellen, die Bildung von Ruhe- und Aktionspotenzialen sowie deren Weiterleitung und Übertragung. Kenntnisse über die Anatomie des Herzens und des Muskels sind vorteilhaft, aber nicht obligatorisch.

Lernziele: Bezüge herstellen zwischen der Funktionsweise einzelner Nervenzellen und deren Resultat auf systemischer Ebene; Verständnis über Entstehung von Summenpotenzialen; Messen und Analysieren von EKGs; Verstehen der Funktionsweise des elektrischen Leitungssystems des Herzens; Auswerten von Messungen der elektrischen Muskelaktivität; Interpretation von EEG-Spuren.

Programm:



„Im Themenfeld ‚Neurobiologie‘ erarbeiten sich die Lernenden grundlegende neurophysiologische Vorgänge und elementare Mechanismen der Informationsverarbeitung auf der zellulären bzw.

molekularen Ebene“ (Hessisches Kultusministerium 2016, S. 36). Das prinzipielle Verständnis der Funktionsweise einzelner Nervenzellen beruht auf elektrophysiologischen Methoden und Erkenntnissen. Für das dritte Konzept (**SLT „Neuro?Logisch! – Elektrophysiologie**) wurde daher ein Mess-Setup für die Sekundarstufe II konzipiert, an dem die Schüler eigenständig an einem quasi-realen Messaufbau die Forschungsmethode der Elektrophysiologie praktisch nachvollziehen können. Für die authentische Umsetzung wurden Komponenten eines realen Elektrophysiologie-Setups mit virtuellen Komponenten verbunden (EPhys-Setup, für eine genaue Beschreibung vgl. Kapitel 5.3):

- Eine speziell entwickelte schülerfreundliche Software zur Steuerung der Experimente und Darstellung der Messspuren (Neurosimulation);
- Ein virtuelles Nervensystem (eine spezielle Platine mit dem Foto eines Blutegel-Ganglions);
- Binokulare zur optischen Kontrolle, Messelektroden zum „Einstechen“ in die Nervenzellen und Mikromanipulatoren zur Steuerung der Messelektroden (Hands-on Komponenten).

Am Modellnervensystem der Ganglien von *Hirudo medicinalis* (medizinischer Blutegel) lernen die Schüler praxisnah morphologische und funktionelle Eigenschaften verschiedener Nervenzellen sowie elektrophysiologische Messverfahren kennen. Dazu führen sie verschiedene Versuche und Messmethoden durch und untersuchen unter anderem die Wirkung von neuronalen Botenstoffen auf verschiedene Nervenzellen. Die Reaktionen der Zellen können dabei ohne Zeitverlust verfolgt werden. Die aufgezeichneten Messspuren werden unter Berücksichtigung neurophysiologischer Fragestellungen in Gruppenarbeit (2–4 Schüler) ausgewertet und interpretiert. Die Kleingruppen arbeiten an einer der vier möglichen Nervenzellen des Ganglions (R-, AP-, P- und N-Zelle) und interpretieren anhand ihrer elektrophysiologischen Ergebnisse, an welcher in der Literatur beschriebenen Zelle sie gemessen haben. Die Ergebnisse werden im Plenum verglichen und diskutiert. Das entwickelte Konzept kommt dadurch ohne jeglichen Tierverbrauch aus, kann große Schülergruppen praktisch an die Elektrophysiologie heranführen und ist inhaltlich-didaktisch an das Oberstufenniveau angepasst.

Aufbauend auf den elektrophysiologischen Eigenschaften und dem Zusammenspiel der Nervenzellen im Modellsystem des Ganglions, wird für eine vergleichende Betrachtung der Komplexitätsebenen der Zentralnervensysteme auch an diesem SLT eine EEG-Messung im Demonstrationsversuch erläutert (EMOTIV EPOC+ 14 Channel Mobile EEG). Die morphologischen Grundlagen werden mit den elektrophysiologischen Eigenschaften in Zusammenhang gebracht und ein Vergleich mit der Organisationsform des Blutegel-Ganglions wird gezogen. So können die Schüler einen Bezug zur Funktionalität des eigenen Körpers herstellen und einen Einblick in das Wahlthemenfeld Q3.4 zum „Gehirnaufbau und seiner Funktion beim Menschen“ erhalten.

Titel: Neuro?Logisch! – Elektrophysiologie

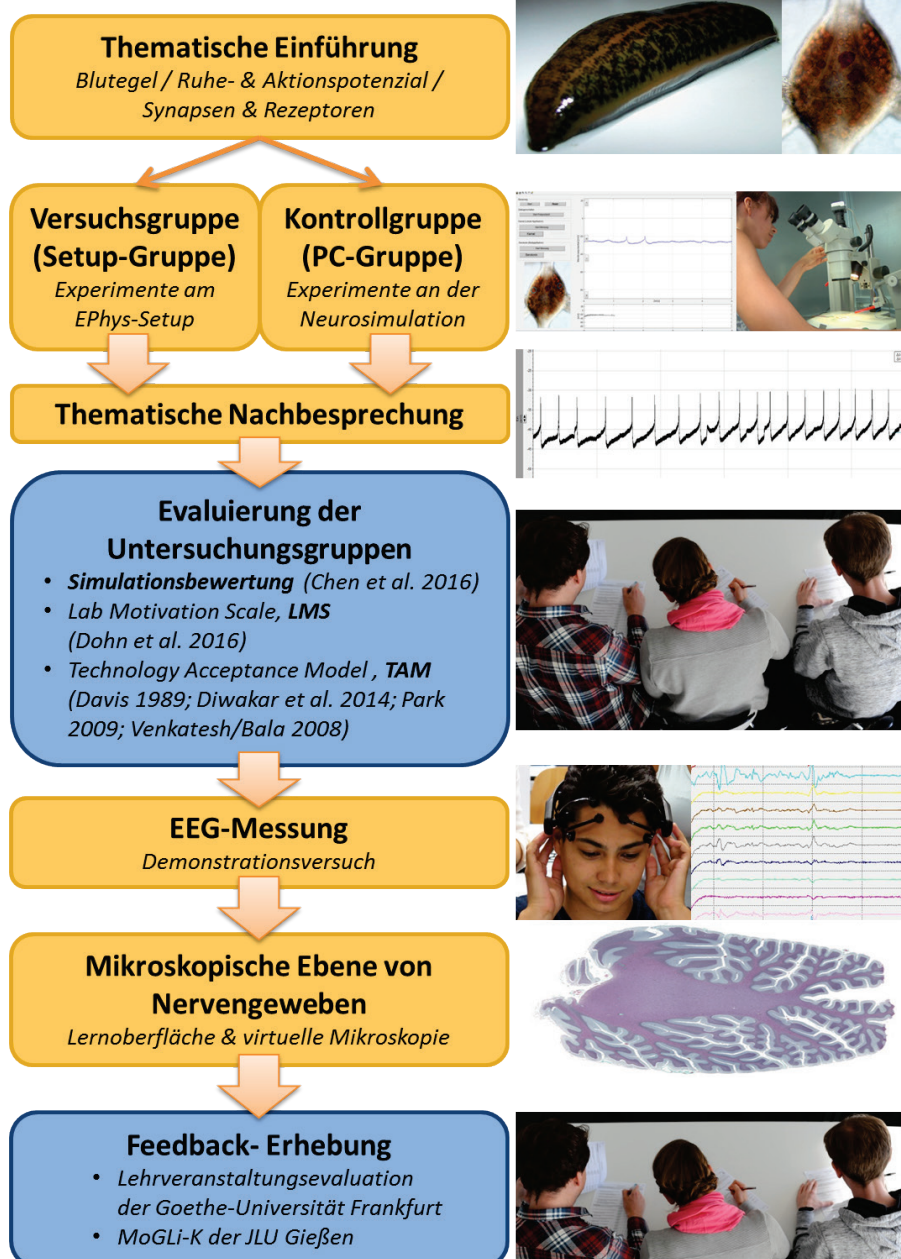
Thema: Virtuelle Ableitungen von Nervenzellen & ihre Auswertung; Mikroskopie von Nervenzellen

Zielgruppe: Sekundarstufe II

Voraussetzungen: Den Schülern müssen Grundlagen der Elektrophysiologie bekannt sein. Diese beinhalten den Aufbau von Nervenzellen, die Bildung von Ruhe- und Aktionspotenzialen sowie deren Weiterleitung und Übertragung.

Lernziele: Anwenden relevanter Forschungs- und Arbeitsweisen in der Neurobiologie; Erarbeiten und Interpretieren der morphologischen und funktionellen Eigenschaften von Nervenzellen; Durchführen elektrophysiologischer Messverfahren.

Programm:



Zur Erweiterung der Kenntnisse über die funktionellen Eigenschaften von Nervenzellen und Nervensystemen findet am Nachmittag eine mikroskopische Betrachtung der Strukturen statt. Mit einem abteilungsinternen virtuellen Mikroskop betrachten die Schüler unterschiedliche neurobiologische Präparate von Nervenzellen und Nervengeweben am Computer (Greßler et al. 2017). Die Schüler haben so die Möglichkeit, unterschiedlichste Färbungen und Präparate kennen zu lernen und u. a. das Gehirn eines Guppys mit dem eines Orang-Utans kriteriengeleitet zu vergleichen.

5.3 Das Elektrophysiologie-Setup

Das entwickelte EPhys-Setup ist ein quasi-realer Messaufbau, mit dem die Forschungsmethode von elektrophysiologischen Messungen im Experiment praktisch nachvollzogen werden kann. Die Umsetzung kombiniert dazu Komponenten eines realen Elektrophysiologie-Setups (Hands-on Komponenten) mit einer speziell entwickelten schülerfreundlichen Software (Neurosimulation) und einem virtuellen Nervensystem in Form einer Fotoplatine. Als Modellnervensystem werden für diese Umsetzung Ganglien des medizinischen Blutegels (*Hirudo medicinalis*) verwendet. Durch die Anwendung der menügeführten Benutzeroberfläche (Guided user interface; GUI) der Neurosimulation können die Schüler die Experimente eigenständig steuern und die Änderungen des Membranpotenzials an gemessenen Neuronen des virtuellen Präparats beobachten. Im Folgenden sind die Komponenten der Setup Umgebung und deren Benutzung beschrieben.

5.3.1 Aufbau EPhys-Setup

Der an einem realen Mess-Setup orientierte Aufbau besteht aus einem Binokular (Stereomikroskop Stemi DV4, Vergrößerung: 8–32-fach, Carl Zeiss AG Oberkochen) zur Betrachtung des virtuellen Ganglion-Präparats und einem Mikromanipulator (Leitz, Wetzlar) zur Positionssteuerung der Elektrode (**Abbildung 9–10**). Die Messelektrode besteht aus einem isolierten Elektrodenhalter ($l = 11 \text{ cm}$, $\varnothing = 5 \text{ mm}$) in dem eine Metallnadel zur Messung fixiert ist ($l \approx 2,5 \text{ cm}$, $\varnothing \approx 50 \mu\text{m}$) (**Abbildung 11 C**). Sie ist mit einem Input/Output-Board (I/O-Board; USB 8000X, National Instruments) verkabelt (**Abbildung 11 A**), welches an einen Computer (Windows 7, 64 Bit, Intel® Core™ i5-4210M CPU @ 2.60GHz) angeschlossen ist, der zur Steuerung der Neurosimulation verwendet wird. Die Platine des virtuellen Ganglions ist ebenfalls mit dem I/O-Board verkabelt (**Abbildung 11 B**).

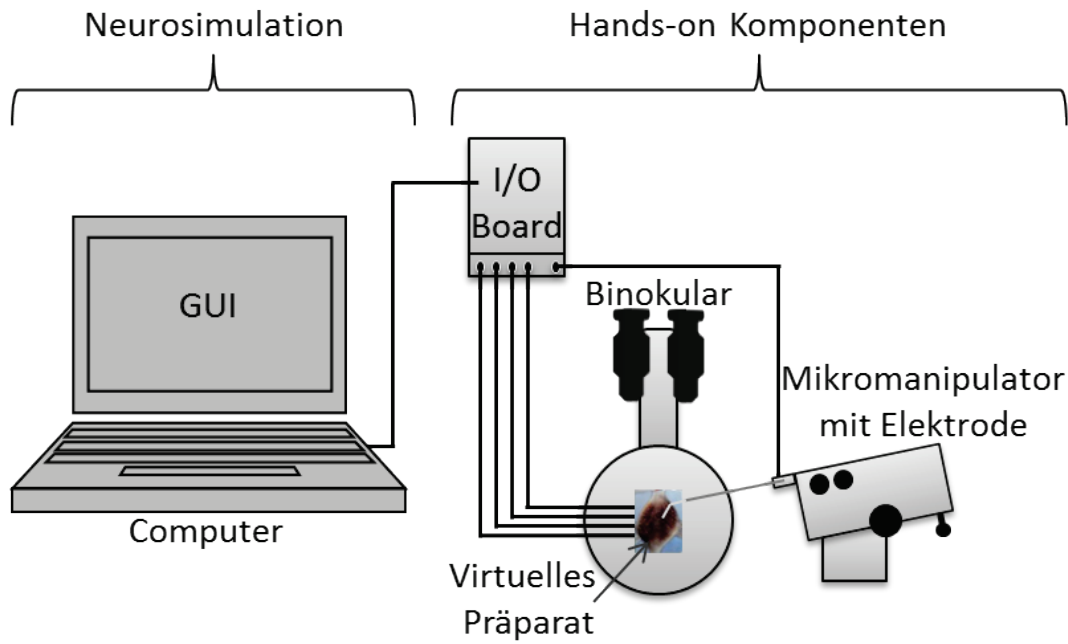


Abbildung 9: Schematischer Aufbau des EPhys-Setups.

Die Setup Umgebung besteht aus einem virtuellen Präparat eines Blutegel-Ganglions. Die Modellneurone sind verbunden mit einem I/O-Board. Das I/O-Board ist an einen Computer angeschlossen, auf dem die GUI der Neurosimulation läuft. Die GUI ermöglicht die Steuerung der Experimente und zeigt die elektrophysiologische Reaktion der Modellneuronen. Das Setup ist außerdem ausgestattet mit einem Binokular zur Aufsicht auf das virtuelle Präparat und einem 3-Achsen Mikromanipulator zur Feinpositionierung der Messelektrode.

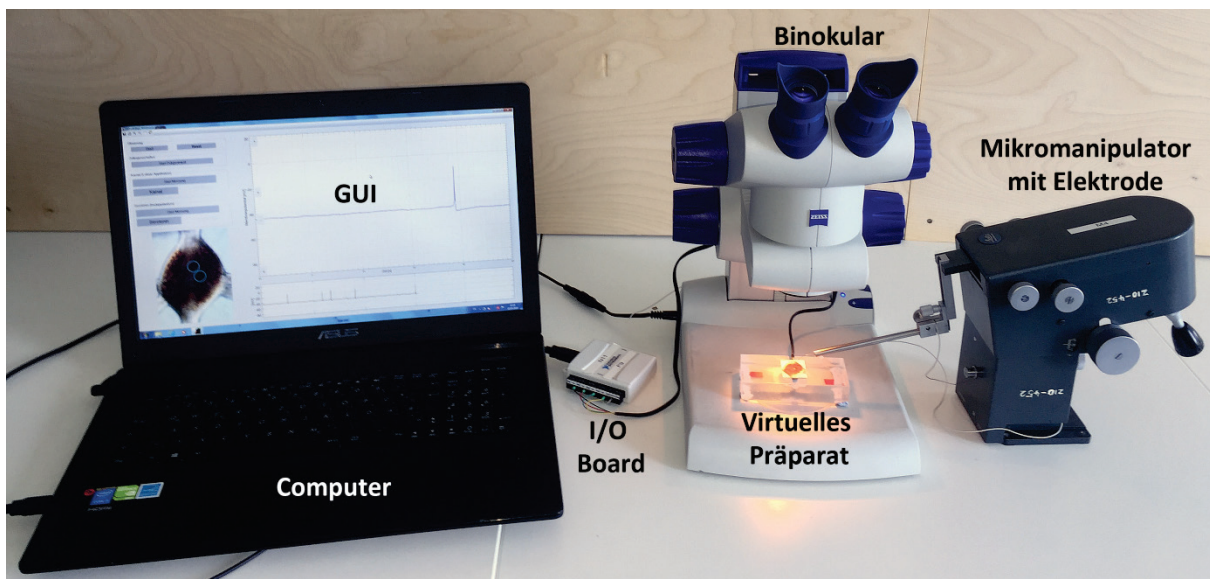


Abbildung 10: Realer Aufbau des EPhys-Setups.

Detailbeschreibung vgl. Abbildung 9.

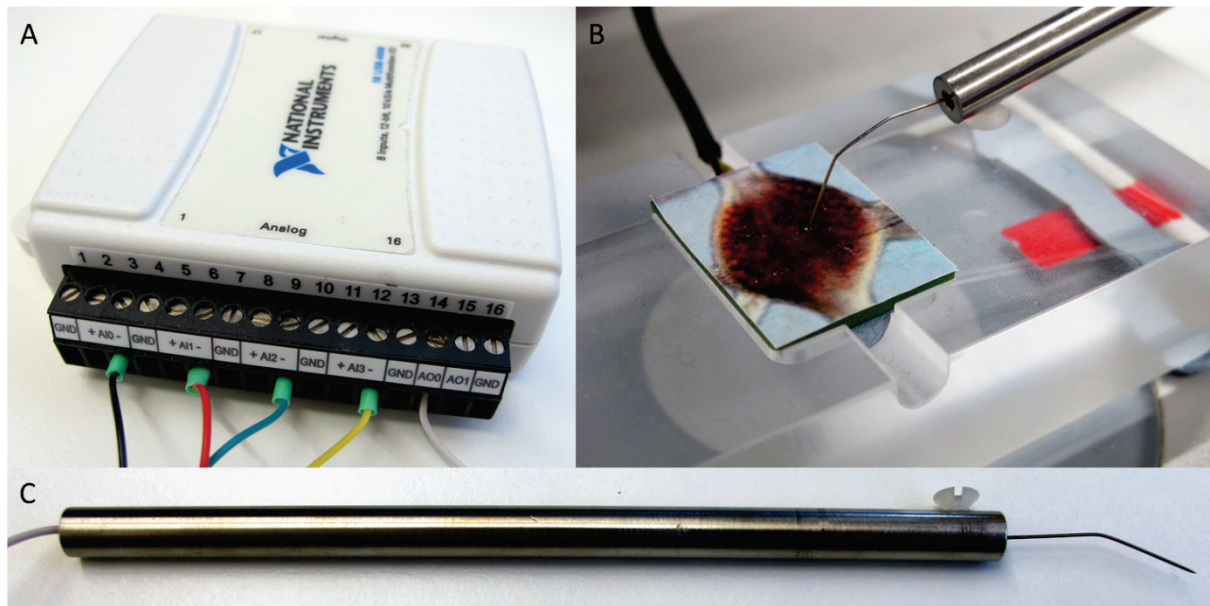


Abbildung 11: Einzelkomponenten des EPhys-Setups im Detail.

A: Input/Output-Board; B: Virtuelles Präparat auf Objektträger und mit aufgesetzter Messelektrode; C: Messelektrode.

5.3.2 Virtuelles Präparat

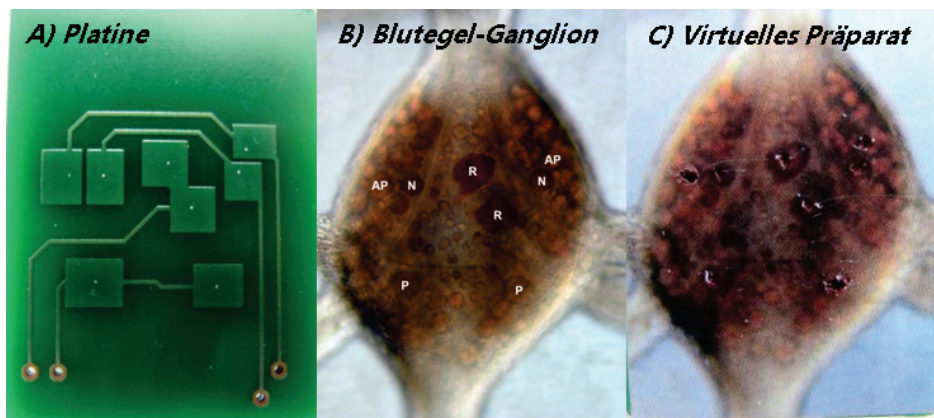


Abbildung 12: Konstruktion des virtuellen Nervensystems eines Blutegel-Ganglions.

A) Platine mit vier Kontaktpunkt-Paaren, welche die Modellneurone widerspiegeln. Deren Lokalisation korrespondiert mit den Positionen der eingesetzten Nervenzellen. B) Aufsicht auf ein Ganglion von *H. medicinalis*. Die vier unterschiedlichen Zelltypen, welche im Setup Umfeld verwendet werden, sind beschriftet (AP: Anterior-Pagoda-Zelle, N: Noxious-Zelle, P: Pressure-Zelle, R: Retzius-Zelle). C) Platine aus A) mit aufgebrachtem vergrößertem Foto des realen Präparats, an acht Stellen perforiert, um die Kontaktstellen darunter freizulegen.

Die Ganglien des medizinischen Blutegels sind ein etabliertes, neurobiologisches Modellsystem. Blutegel-Ganglien bilden ein relativ einfaches neuronales Netzwerk, welches aus 200 Nervenzellpaaren besteht. Die meisten dieser Neurone sind in ihren charakteristischen anatomischen, molekularen und funktionalen Eigenschaften gut beschrieben (u. a. Sawyer 1986). Das virtuelle Ganglion, welches für das EPhys-Setup entwickelt wurde, besteht aus einer Platine (2,25 cm x 3 cm), auf der vier Paare elektrischer Kontaktpunkte liegen (8 Kontakte je $\varnothing = 100 \mu\text{m}$) (**Abbildung 12 A**). Die vier Kontaktpaare repräsentieren unterschiedliche Neuronentypen, die im Ganglion zu finden sind (2 x Anterior-Pagoda-Zelle, 2 x Noxious-Zelle, 2 x Pressure-Zelle, 2 x Retzius-Zelle) (**Abbildung 12 B**). Die Lokalisation der Kontaktpunkte auf der Platine korrespondiert mit der Position der unterschiedlichen Zelltypen des realen Blutegel-Ganglions. Für das fertige virtuelle Ganglion wird auf die Platine ein passendes vergrößertes Foto des realen Ganglions aufgebracht. Das Foto weist in der Position der Modell-neuronen acht kleinere Aussparungen auf, um die Kontaktstellen der Platine freizulegen (**Abbildung 12 C**). Durch das aufgebrachte Bild wird dem Schüler (Experimentator) die Vorstellung vermittelt, mit einem realen Präparat zu arbeiten. Weiterhin wird vermittelt, dass Nervenzellen sich morphologisch, in ihrer Position im Ganglion sowie in ihren elektrophysiologischen Eigenschaften unterscheiden. Während des Experiments wählt der Schüler eine der Nervenzellen zur Messung aus, indem er die Messelektrode auf die Modellzelle des Ganglions aufsetzt und so einen elektrischen Kontakt schließt. Die Elektrode ist mit einem Output-Kanal (+5 V) eines I/O-Boards verbunden (USB 8000X, National Instruments), mit dem auch die Nervenzellpaare über einen jeweiligen Single Input-Kanal (0 V) verbunden sind. Die Spannung der Input-Kanäle wird ausgelesen und löst bei einem Wechsel der Spannung von 0 auf 5 Volt in der GUI den Befehl zum Einladen der entsprechenden Originalmessdaten aus.

5.3.3 Menügeführte Benutzeroberfläche (GUI) der Neurosimulation

Die schülergerechte GUI der Neurosimulation wurde in MatLab (Version R2015b, The MathWorks, Inc., Natick) programmiert. Diese Oberfläche erlaubt eine einfache Steuerung der Experimente sowie die zeitgleiche Betrachtung der elektrophysiologischen Messdaten der virtuellen Nervenzellen. Die GUI ist unterteilt in vier Bereiche (**Abbildung 13**). Oben links liegen die Buttons zur Steuerung der Experimente (Start; Reset) und zur Auswahl der unterschiedlichen Messprotokolle (Pulsprotokoll; Applikation von Kainat oder Serotonin). Im Fenster unten links wird ein Foto des Blutegel-Ganglions gezeigt. Zur leichteren Orientierung wird das im Experiment aktive Neuron markiert (Kreis). Im Hauptfenster der GUI werden die Messdaten aus Originalexperimenten im Live-Modus angezeigt (Update Frequenz: $\sim 9 \text{ Hz}$). Abhängig von dem gewählten Neuron und dem Messprotokoll werden

die Messdaten des jeweiligen Experiments aus einer Datenbank importiert. Im unteren Teil der GUI findet sich ein zweites Datenfenster, welches zwei Funktionen erfüllt:

- 1) Für die Applikations-Messungen zeigt es einen Überblick über die gesamte Messung;
- 2) Für das Pulsprotokoll werden hier die applizierten Injektionsströme des jeweiligen Versuchs angezeigt.

Mit diesen Komponenten ermöglicht die GUI, dass unterschiedliche Experimente an vier beispielhaften Neuronentypen durchgeführt werden können. Das erarbeitete Design des Setups erlaubt somit die selektive Auswahl einzelner Neurone, die Ausrichtung der Messelektrode und die Herstellung des elektrischen Kontaktes sowie die Betrachtung und Analyse von hinterlegten realen Messdaten. Im Folgenden werden die möglichen Experimente, deren Inhalte und die vier Nervenzelltypen beschrieben.

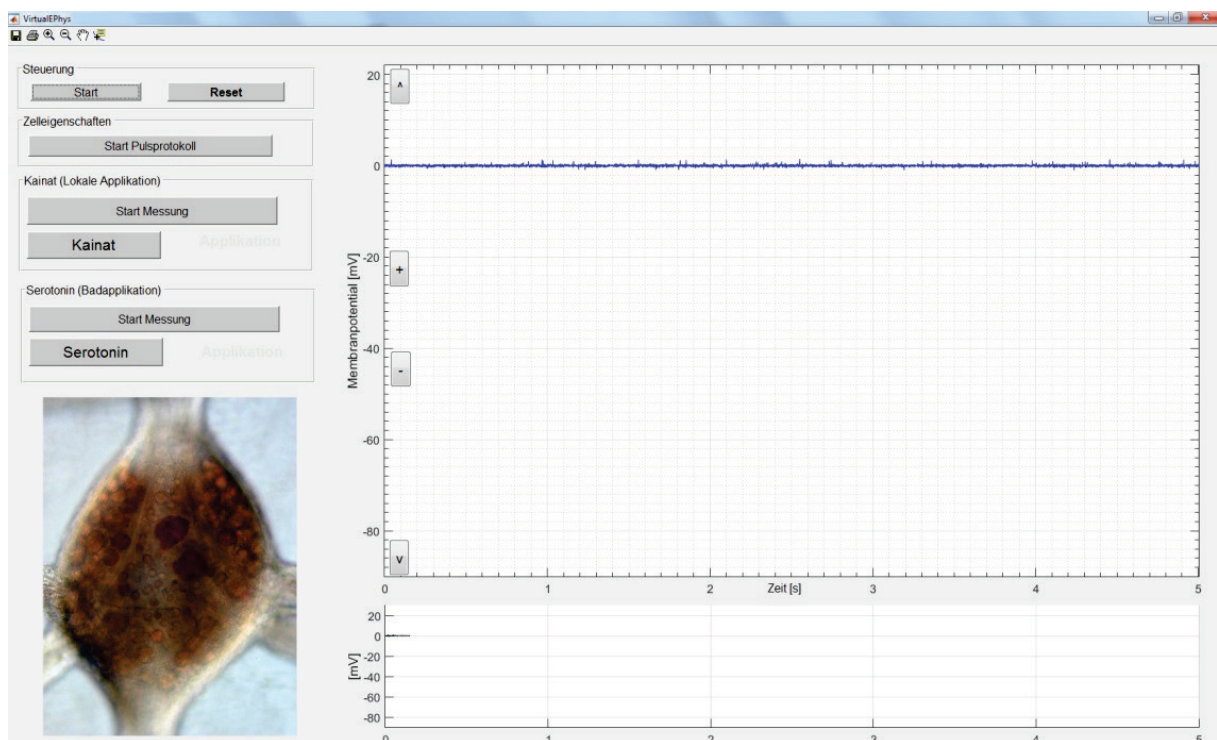


Abbildung 13: Die GUI der Neurosimulation zur Steuerung der Experimente und Ansicht der Messspuren.

Die GUI besteht aus den Kontrollbuttons (oben links), einem Foto des Blutegel-Ganglions, auf dem das Modellneuron markiert wird, welches gemessen wird (unten links), einem Hauptmessfenster, welches das Membranpotential der Messspuren live anzeigt (oben), und einem zweitem Messfenster, welches ermöglicht, die komplette Messung bzw. das Pulsprotokoll-Kommando zu sehen.

5.3.4 Die vier exemplarisch untersuchten Nervenzellen

(vgl. Sawyer 1986)

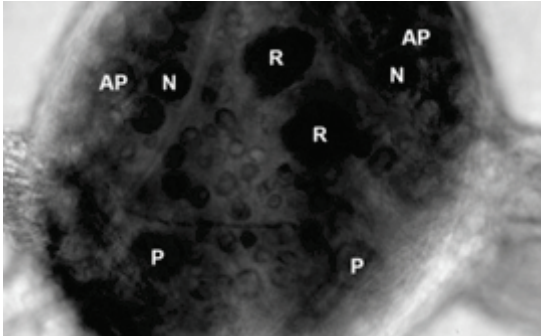


Abbildung 14: Blutegel-Ganglion mit Beschriftung der exemplarisch untersuchten Nervenzellen.

AP: Anterior-Pagoda-Zelle; N: Noxious-Zelle; P: Pressure-Zelle; R: Retzius-Zelle.

Retzius-Zellen

Funktion:	Multifunktionale Zellen (z. B. Schleimabsonderung, Muskelentspannung)
Größe:	80–100 μm (größte Nervenzellen im Ganglion; zum Vergleich: Nervenzellen bei Säugetieren meist 10–20 μm im Durchmesser)
Neurotransmitter:	Serotonin (auch als 5-Hydroxytryptamin oder 5-HT bezeichnet)
Rezeptoren:	Glutamat (erregend) und Serotonin (hemmend)
Sonstiges:	Die Zellen können mit Neutralrot angefärbt werden, welches selektiv Zellen markiert, die den Botenstoff Serotonin tragen.

N-Zellen

Funktion:	Mechanosensorische Zellen, reagieren sensitiv auf Druckreize
Größe:	30–40 μm
Neurotransmitter:	Glutamat
Rezeptoren:	Serotonin (erregend)
Sonstiges:	Das „N“ steht für „noxious“ \rightarrow Schmerzhaftes Druckreize (Die Schwelle für Druckreize ist deutlich höher als bei P-Zellen).

P-Zellen

Funktion:	Mechanosensorische Zellen, reagieren sensitiv auf Druckreize
Größe:	40–60 µm
Neurotransmitter:	Glutamat
Rezeptoren:	Serotonin (erregend)
Sonstiges:	Das „P“ steht für „pressure“ → Druckreize (Die Reizung aktiviert einen Reflexkreis, der eine motorische Reaktion auslöst).

AP-Zellen

Funktion:	Modulatorische Zelle (die genaue Funktion ist ungeklärt)
Größe:	40–50 µm
Neurotransmitter:	FRMF-Peptid (Neuropeptid)
Rezeptoren:	Glutamat (erregend) und Serotonin (hemmend)
Sonstiges:	Die Bezeichnung <i>Anterior-Pagoda-Zelle</i> kommt von der Pagodenform der Aktionspotenziale und der anterioren Lage (Bauchseite) der Zelle im Ganglion. Die Neuropeptide aktivieren metabotrope Rezeptoren, bei denen second messenger (intrazelluläre Botenstoffe) die Wirkung vermitteln.

5.3.5 Versuchsprotokolle***Einstich der Messelektrode***

Über den elektrischen Kontakt der Messelektrode zum gewählten Kontaktpunkt der Platine wird der Einstich der Messelektrode simuliert (vgl. **Abbildung 11 B**). Auf diese Weise misst der Experimentator zunächst die elektrischen Eigenschaften der gewählten Nervenzelle unter physiologischen Bedingungen. Die Schüler können hier bereits erkennen, dass Nervenzellen unterschiedliche elektrische Eigenschaften aufweisen können: Die Retzius-Zelle zeigt synaptisch ausgelöste Potenziale, die AP-Zelle Spontanaktivität, die P-Zelle ein stabiles Ruhepotenzial und die N-Zelle zu Beginn der Messung

sogenannte Verletzungsspikes. Sie erhalten dadurch einen Einblick in die Vielfalt der funktionellen Eigenschaften der Neurone.

Pulsprotokoll (Current-Clamp-Experimente)

Mit der Current-Clamp-Technik (Stromklemme) wird das Membranpotenzial über verschiedene Injektionsströme verändert. Ausgehend vom Ohm'schen Gesetz ($R = U/I$) kann so der Eingangswiderstand der Nervenzelle (R_m) ermittelt werden ($R_m = \Delta E_m / I_{\text{injektion}}$). Der Eingangswiderstand und auch die zeitliche Veränderung des Membranpotenzials während des Stromimpulses hängen u. a. von der Kanaldichte, der vorhandenen Ionenkanaltypen und der Größe des Neurons ab. Während der konzeptionellen Phase zeigte sich, dass die Current-Clamp-Experimente wegen ihrer thematischen Komplexität eine inhaltliche Überforderung der Schüler darstellten. Daher wurden in der Erhebungsphase der in der vorliegenden Arbeit dargestellten Ergebnisse diese Experimente nicht mehr durchgeführt (vgl. Kapitel 5.2).

Applikation von Agonisten für Neurotransmitter-Rezeptoren

Nach dem Starten der jeweiligen Messung können die Schüler selbstbestimmt einen Agonisten (Kainat oder Serotonin) applizieren. Bei der Applikation von Kainat (50 μM , partieller Agonist für non-NMDA Glutamat-Rezeptoren) kann zunächst erarbeitet werden, dass Nervenzellen nicht jeden Neurotransmitter-Rezeptor besitzen. So zeigen die P- und die N-Zelle keine Reaktion auf den Agonisten, was auf die Abwesenheit von Rezeptoren für Kainat schließen lässt. Zusätzlich unterscheidet sich die Depolarisation bei Retzius- und AP-Zellen, sodass auch hier zellspezifische Eigenschaften zu einer Variation führen. Die unterschiedlichen Reaktionen auf Agonisten werden in den Experimenten mit Serotonin (3 mM, unspezifischer voller Agonist) deutlich. In diesem Fall aktiviert Serotonin zwei unterschiedliche Rezeptortypen, deren funktionelle Bedeutung bei der Reizübertragung mit den Schülern besprochen wird. So antworten die P- und N-Zelle mit einer Depolarisation auf die Serotonin-Applikation, wohingegen die Retzius- und AP-Zellen eine Hyperpolarisation aufweisen. Fehlvorstellungen, zu denen eine eindeutige Zuordnung hinsichtlich eines erregenden oder hemmenden Neurotransmitters gehört, können so korrigiert und die Rolle der unterschiedlichen Rezeptortypen besprochen werden. Auch die unterschiedlichen Applikationsformen (Kainat über eine lokale Applikation oder Serotonin als Zusatz zur Badlösung) werden in diesem Zusammenhang thematisiert.

5.3.6 Die Neurosimulation der Kontrollgruppe

Für die vergleichenden Studien des EPhys-Setups mit Fokus auf die Hands-on Komponenten des nachgebildeten Mess-Setups wurde die GUI adaptiert, sodass die Schüler ohne zusätzlichen Setup Aufbau (Binokular, Ganglion-Platine, Mikromanipulator mit Messelektrode, I/O-Board) dieselben Versuche an einer reinen PC-Umsetzung (Neurosimulation) durchführen konnten (Kontrollgruppe). Für diesen Zweck wurde in die GUI ein Button für eine Messelektrode implementiert (**Abbildung 15**). Wird dieser verwendet, erscheint ein Fadenkreuz, mit dessen Hilfe die gewünschte Nervenzelle ausgewählt werden kann. Der entsprechende Mausklick ersetzt in diesem Fall den „Einstich“ in die Nervenzelle, also die Kontaktherstellung zwischen Messelektrode und Kontaktpunkt auf der Ganglion-Platine. Die Messdaten und Durchführungen sowie alle weiteren Funktionen der GUI sind identisch mit den oben beschriebenen.

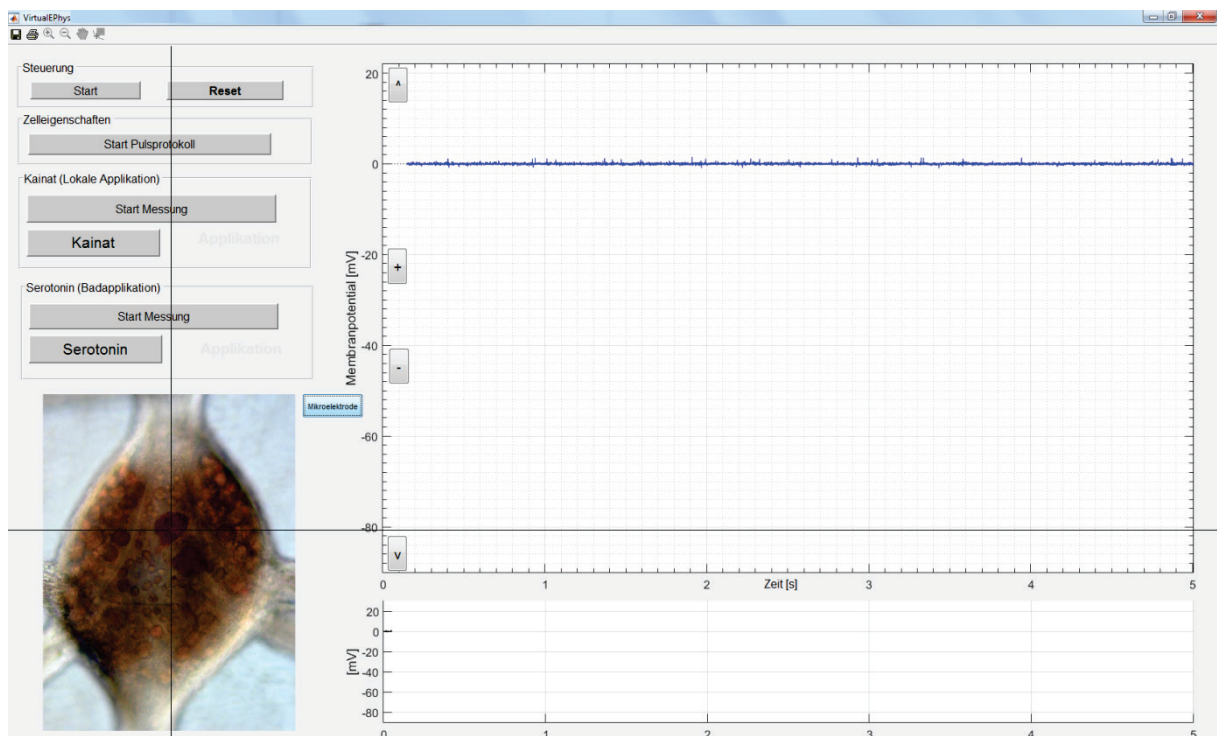


Abbildung 15: Die Neurosimulations-GUI der Kontrollgruppe zur Steuerung der Experimente und Ansicht der Messungen.

Die Detailbeschreibung entspricht Abb. 13. Ergänzend liegt neben dem Ganglion-Foto ein Button zur Ansteuerung der Messelektrode, welche sich in Form eines Fadenkreuzes auf der Oberfläche präsentiert.

5.3.7 Authentizität des EPhys-Setups

Zu den wichtigen Zielen naturwissenschaftlicher Bildung gehört es, Schülern ein authentisches Bild von Forschung zu vermitteln. Dies begünstigt einerseits die von Betz et al. (2016) aufgeführten Effekte auf die affektive und kognitive Ebene und fördert andererseits ein authentisches Bild von den Aufgaben, Arbeitsweisen und Leistungen in den Naturwissenschaften (Chinn und Malhotra 2002; Ringelband et al. 2001), um somit geeigneten Nachwuchs für die jeweilige Disziplin zu gewinnen.

Chinn und Malhotra (2002) diskutieren die Authentizität ausgehend von den kognitiven Prozessen und den Erkenntnistheorien wissenschaftlicher Forschung. Nach dem Modell von Betz et al. (2016) kennzeichnen die Merkmale eingesetztes Material, Lernort, Vermittler (Betreuer), Inhalte, Methoden sowie Innovation maßgeblich die Authentizität des jeweiligen Lernsettings (vgl. **Abbildung 3** sowie Kapitel 1.2). Bezüglich dieser Merkmale erfüllt das vorgestellte EPhys-Setup die meisten Kriterien. Die Lernumgebung im Sinne des situierten Lernens erlaubt Einblicke in die Arbeit von wissenschaftlichen Instituten. Dies ist insofern gegeben, als der SLT in einem universitären Schülerlabor angesiedelt ist. Direkt damit verbunden ist der authentische Betreuer, der sowohl einen Einblick in die Forschungsarbeit der Arbeitsgruppe als auch explizit in den Bereich der Versuche des EPhys-Setups gibt. In Bezug auf die Materialien und Methoden erreicht das EPhys-Setup annähernd realistische Bedingungen, da die meisten authentischen Materialien während des Forschungsexperiments eingesetzt werden oder simuliert vorliegen (vgl. **Tabelle 7**). Die Methodik imitiert das reale Vorgehen im Forschungsexperiment so authentisch wie möglich. Zusätzlich wird die Durchführung des Forschungsexperiments theoretisch mit den Schülern behandelt und erläutert. Im Hinblick auf die Inhalte werden reale Bezüge zu authentischen Forschungsexperimenten hergestellt und die aktuelle Forschung mit einbezogen. Nicht vorzufinden ist die Innovation in Form der Bearbeitung von Fragen oder Problemen aktueller Forschung, zu denen die Lernenden beitragen. Im Sinne der authentischen Forschung nach Chinn und Malhotra (2002) finden sich weniger übereinstimmende Merkmale einer authentischen Forschung bei dem umgesetzten EPhys-Setup. Dennoch können Merkmale auf das Setup übertragen werden. Die in authentischen Experimenten nötige Überwachung von Kontrollvariablen ist zwar nicht praktisch umgesetzt, wird jedoch mit den Schülern theoretisch behandelt, indem z. B. die Einflüsse der korrekten Lösungsansätze oder der Perfusionsgeschwindigkeit thematisiert werden. Außerdem übertragen die Schüler ihre Beobachtungen in eine eigene grafische Darstellung der Messung und interpretieren diese. Hierbei werden auch die numerischen Werte ermittelt, sodass das Merkmal der Übertragung in andere Datenformate erfüllt wird. Durch die vergleichende Betrachtung der Nervenzellen findet eine Beurteilung der Generalisierbarkeit statt. Die Verwendung von realen Messspuren fördert auch die zielgerichtete Auseinandersetzung mit potenziellen Fehlerquellen und Störungen, die im Zusammenhang mit der erkenntnistheoretischen

Authentizität bedeutungsvoll erscheinen. Ihre Verwendung ist mit auftretenden Artefakten verbunden, die mit den Schülern diskutiert und interpretiert werden. Zusätzlich wird die natürliche Heterogenität in den Membranpotenzialwerten von Messung zu Messung erfasst und mit den Schülern thematisiert. Chinn und Malhotra (2002) erklären, dass der Anspruch für ein möglichst authentisches Experiment jedoch nicht darin besteht, jedes Merkmal der Authentizität einzubeziehen. Zudem müssen die Merkmale an die jeweilige Zielgruppe angepasst sein. Zusammenfassend kann das EPhys-Setup überwiegend als authentisches Experiment angesehen werden, welches im Besonderen bezüglich der Merkmale authentischer Methoden und Materialien einen Einblick in das Forschungsexperiment der elektrophysiologischen Messungen an Nervenzellen ermöglicht. Dadurch trägt es auch zur Vermittlung einer konkreteren Vorstellung von universitärer Ausbildung und Forschung bei. Eine vergleichende Darstellung des authentischen Forschungsexperiments zur Umsetzung im Schülerlabor ist in **Tabelle 7** zusammengefasst.

Tabelle 7: Gegenüberstellung des realen Forschungsexperiments von elektrophysiologischen Messungen an Nervenzellen und der Umsetzung des EPhys-Setups im Schülerlabor.

	Reales Forschungsexperiment von elektrophysiologischen Messungen an Nervenzellen	Simulierte elektrophysiologische Messungen an Nervenzellen im Schülerlabor (EPhys-Setup)
Vorbereitung	<ul style="list-style-type: none"> - Präparation Blutegel-Ganglion und Versuchslösungen ansetzen 	<ul style="list-style-type: none"> - Präparation und Vorbereitung wird mit Fotos theoretisch erläutert
Mess-Stand	<ul style="list-style-type: none"> - Mikromanipulator - Mikroelektrode - Präparat - Lösungszuläufe - Faraday-Käfig - Oszillographische Aufzeichnung 	<ul style="list-style-type: none"> - Mikromanipulator - Messelektrode - Virtuelles Präparat (Platine) - Nicht dargestellt - Optional - Oszillographische Aufzeichnung
Durchführung	<ul style="list-style-type: none"> - Einstechen in die gewünschte Nervenzelle - Lösungszuläufe variieren über Computersteuerung - Messung der Membranpotenziale 	<ul style="list-style-type: none"> - Einstechen simuliert durch Kontaktherstellung mit der Platine - Simulierte Lösungszuläufe variieren über Computersteuerung - Messung der Membranpotenziale anhand realer Messspuren
Auswertung	<ul style="list-style-type: none"> - Auswertung und Interpretation der gemessenen Spuren 	<ul style="list-style-type: none"> - Auswertung und Interpretation der gemessenen Spuren - Aktuelle Ergebnisse der Forschung werden beispielhaft vermittelt

Sheorey et al. (2011, S. 36f) differenzieren zwischen vier Kategorien der Simulationsexperimente im Labor:

- 1) **Rein Simulations-basiertes Modell:** Modelliert ein Phänomen durch eine Reihe von zugrunde liegenden Gleichungen und führt die Simulation aus, um die Ergebnisse hinsichtlich der Parameterauswirkung zu veranschaulichen. Diese Simulation kann bestenfalls eine ungefähre Version des Echtzeitexperiments liefern.
- 2) **Hardware-in-the-loop Simulation:** Die Experimente sind mit Software konzipiert. Jedoch wird Hardware integriert und die Simulation im Labor mit einem Echtzeitexperiment-Setup durchgeführt.
- 3) **Bereitstellung entsprechender Messdaten für das virtuelle Laborexperiment:** Der Versuchsaufbau wird z. B. anhand von Videos demonstriert. Anschließend werden umfangreiche Messdaten zur Verfügung gestellt, die zuvor an einem tatsächlichen Versuchsaufbau gemessen wurden. Durch diese Daten kommt man dem Echtzeitexperiment näher.
- 4) **Remote-gesteuert:** Der Lernende kann von einem anderen Ort auf die realen Experimente zugreifen. Dabei wird das Experiment in einem tatsächlichen Labor in Echtzeit durchgeführt und der Datenzugriff auf die Messergebnisse erfolgt über die Computerschnittstelle.

Das konzipierte EPhys-Setups stellt eine Kombination aus Kategorie 2 und 3 dar. Neben der Integration von realen Apparaturen des Experiments (vgl. Kapitel 5.3.1) liegen der Neurosimulation Messdaten zugrunde, die aus realen elektrophysiologischen Ableitungen stammen und in die Simulation integriert wurden. Die Simulationsumsetzung der Kontrollgruppe (vgl. Kapitel 5.3.6) entspricht demnach Kategorie 3, da in diesem Fall auf den Einsatz der Hardware (Hands-on Komponenten) verzichtet wurde.

Bezugnehmend auf die Gestaltungskategorien von computerbasierten Lernumgebungen (vgl. **Tabelle 4** sowie Kapitel 2.3.1) begegnet das EPhys-Setup der Kritik an Simulationen (vgl. Kapitel 2.3) auf neue Art und Weise. Die fehlenden Praxiskomponenten (u. a. Lewis 2014) werden von den bisher in der Literatur beschriebenen Umsetzungen beispielsweise aufgegriffen, indem die Versuchsdurchführungen (z. B. Kontrolle einer Mikroelektrode) simuliert werden (Kategorie 3). Die Umsetzung des EPhys-Setups bietet dazu einen realen Aufbau, der sich an einem Elektrophysiologie-Setup aus der Forschung orientiert und mit der Neurosimulation zur Steuerung der Experimente verbunden ist. Den Schülern wird dadurch ein einzigartiger Zugang zur Technik und Methodik des Experiments geboten. Damit integriert die Umsetzung eine Hands-on Praxiskomponente. Der „Einstich“ der Zelle ist so gestaltet, dass die Schüler nicht beim ersten Versuch Erfolg haben. Damit entfällt die Notwendigkeit der Gestaltungskategorien 2 und 3. Die eigentlich vorangehende Präparation des Blutegel-Ganglions

wird mit den Schülern – wie auch in anderen Umsetzungen – mit Hilfe einer Fotodokumentation besprochen (Kategorie 5). Der Vermittlungsansatz von „*SimNerv*“ – in dem zunächst Informationen zur Lebensweise der Frösche vermittelt werden, damit die Lernenden das Tier als Ganzes betrachten (Tchaptchet et al. 2013) – wird ebenfalls berücksichtigt. Dementsprechend steht im Schülerlabor ein Aquarium mit Blutegeln (*Hirudo medicinalis*) zur Anschauung bereit, sodass die Schüler die Verhaltensweisen der Tiere am realen Objekt beobachten können. Außerdem wird in der theoretischen Besprechung der Inhalte die Lebensweise der Tiere betrachtet. Der Kritik der mangelnden Heterogenität und der künstlichen Säuberung der Daten (u. a. Chinn und Malhotra 2002) wurde in den beschriebenen Umsetzungen zum einen durch eine komplexere Berechnung der Daten entgegengewirkt, durch die eine Heterogenität berechnet wird und Messschwierigkeiten integriert werden (Kategorie 4). Zum anderen finden sich Neurosimulationen, in denen die Daten auf der Grundlage realer Forschungsexperimente berechnet werden (Kategorie 7). Die für die vorliegende Arbeit entwickelte Neurosimulation bietet die Bereitstellung von Messdaten realer Forschungsreihen. Die Ergebnisse der Schüler liegen demnach nicht als Berechnung vor, sondern die GUI ruft aus einer Datenbank die entsprechende Messung im Original ab. Die Daten sind nicht gesäubert und weisen eine natürliche Heterogenität sowie Messstörungen auf. Die Schüler erhalten dadurch einen Zugang zur Analyse und Auswertung von tatsächlichen Forschungsspuren und begegnen dabei u. a. Messungenauigkeiten, Artefakten oder Schwankungen von Messung zu Messung, mit denen sie umgehen müssen. Damit entfällt auch die Notwendigkeit der Gestaltungskategorien 1, 4 und 7.

6 Wissenschaftliche Forschungsarbeit

6.1 Stichprobe

Die Datenerhebung erfolgte im Rahmen der Kursbesuche im „Schülerlabor Neurowissenschaften“. Die Feedback-Erhebungen der Schüler und Lehrkräfte wurden am Ende des SLT ausgefüllt; die Erhebungen zum EPhys-Setup bzw. zur Neurosimulation fanden im Anschluss an die Versuche statt (vgl. Kapitel 5.2). Ergänzend wurde eine Erhebung zu experimentellen Umsetzungen biologischer Themengebiete in der Schule bei Lehrkräften durchgeführt, die Angebote des Goethe-BioLabs oder des „Schülerlabors Neurowissenschaften“ wahrgenommen hatten. Um eventuelle Testverfälschungen durch Einflussvariablen in der Betreuung und Durchführung zu vermeiden, wurde darauf geachtet, die jeweiligen Laborangebote stets in gleicher Umsetzung, mit gleichen Inhalten und konstanten

Betreuern (die Verfasserin mit einer von drei konstanten Hilfskräften) durchzuführen. Die Erhebungen erfolgten anonym mit einem Erkennungscode für den Fall einer nötigen Zuordnung der unterschiedlichen Testinstrumente. Die vollständigen Fragebögen sind in Anhang B dokumentiert.

Lehrkräfte: n = 73 (w = 55; m = 18), hessische Lehrkräfte, im Schnitt seit 4-9 Jahren im Lehrerberuf, an Gymnasien (46), Gesamtschulen (9), Oberstufengymnasien (7) und beruflichen Schulen (3).

Schüler: Alle Schüler besuchten zum Zeitpunkt der Erhebung die Sekundarstufe II in der Qualifikationsphase 3 bzw. 4 und waren zwischen 17 und 20 Jahre alt. Insgesamt nahmen 423 Schüler (29 Labortermine) im Zeitraum August 2017 bis Februar 2018 an den Befragungen teil, die Verteilung auf die unterschiedlichen Befragungsinstrumente ist in **Tabelle 8** aufgeführt. Bei allen Versuchsanätzen wurde auf eine randomisierte Verteilung der Schüler geachtet (für eine detailliertere Verteilung der Stichproben vgl. Anhang C).

Tabelle 8: Verteilung der Stichprobengrößen auf die Erhebungsinstrumente, Geschlechter und Kursformen.

Erhebungsinstrument	Stichprobengröße	Stichprobenverteilung			
		Geschlecht		Kursform	
		W	M	LK	GK
Feedback	381	242	139	313	68
Simulationsbewertung & LMS	235	149	86	200	35
TAM	193	126	67	158	35

6.2 Befragungsinstrumente

6.2.1 Befragung der Lehrkräfte

Die Feedback-Erhebung der Lehrkräfte ist angelehnt an den Musterfragebogen der Hessischen Lehrkräfteakademie (2013) zur Evaluation von Fortbildungsveranstaltungen. Für eine statistische Erfassung wurden die demografischen Daten übernommen. Aus dem Fragenkatalog wurden sechs auf die SLT übertragbare Items ausgewählt (Beispielitem: „*Ich bin mit den erzielten Ergebnissen der Schülerinnen und Schüler zufrieden*“). In der Fragebogendokumentation fett hervorgehoben, Anhang B) und

durch vier weitere Items ergänzt, welche explizite Rückmeldungen zum Schülerlabor erfragen (Beispielitem: „Für mich stellt der Besuch von Schülerlaboren eine sinnvolle Ergänzung zum Fachunterricht dar“). Die Ermittlung der gewünschten Themenfelder für Angebote im Schülerlabor orientierte sich an den Themenfeldern der Schule auf der Basis der Hessischen Curricula für Gymnasien – Sekundarstufe I und II (Hessisches Kultusministerium o. J., 2016) (Beispiel: *Neurobiologie – Aufbau und Funktionsweise von Neuronen*). Die Befragung beinhaltete Themen ab der Jahrgangsstufe 7 und höher. Themenfelder der Stufen 5 und 6 (Säugetiere, Mensch, Blütenpflanzen, Sexualkunde, Anpassung an Lebensräume) wurden nicht berücksichtigt. Zusätzlich wurde auch nach der experimentellen Umsetzung zu diesen Themenfeldern in der Schule gefragt und hierbei zwischen Demonstrations- und Schülerexperimenten unterschieden.

6.2.2 Befragung der Schüler

Feedback

Die Feedback-Erhebung der Schüler zu den drei SLT für die Sekundarstufe II orientierte sich an der Lehrveranstaltungsevaluation der Goethe-Universität (Abteilung Lehre und Qualitätssicherung 2015), wonach ein für das Labor geeigneter Fragebogen erstellt wurde. Items aus folgenden Themenfeldern wurden übernommen und angepasst: Basisfragen zu Lehre und Praktika; Globalurteil; motivieren und lerndienliche Atmosphäre schaffen; Lehrqualitätsscore; wissenschaftlicher Anspruch; Vermittlung von Wissen und Unterstützen von Verstehen. Zudem wurden für eine retrospektive Prä-Post-Erhebung des Lernzuwachses die entsprechenden Items aus dem MoGli-K der Justus-Liebig-Universität Gießen (Servicestelle Lehrevaluation 2015) herangezogen. Nach der „Visible Learning“ Studie von Hattie (2009) besteht die Möglichkeit, die Selbsteinschätzung durch die Schüler mit schulischem Lernerfolg in Verbindung zu bringen. Er zeigte in seiner Metaanalyse, dass die Selbsteinschätzung des Leistungsniveaus (*engl. Originalbezeichnung: self-reported grades*) durch die Lernenden als Faktor mit der größten Effektstärke mit dem schulischen Lernerfolg ($d = 1,47$) zusammenhängt. So erklärt auch Meraner (2014), dass Hattie davon ausgehe, „die Schüler und Schülerinnen wissen relativ genau, was sie können und was sie geleistet haben. Sie wissen um ihre Erfolgchancen Bescheid. Durch die bereits gemachten Lernerfahrungen können die Lernenden ihr Leistungsniveau also relativ exakt einschätzen“ (S. 36). Auch in den aktuellen Werten der Hattie-Studien nach „Visible Learning Plus“ (2018) liegt die Selbsteinschätzung des Leistungsniveaus noch auf Platz 2 mit einer Effektstärke von $d = 1,33$.

Zur vergleichenden Untersuchung der Schülerbewertung zu den SLT wurde das Feedback zusätzlich abhängig vom Schülerinteresse an der Biologie und Forschung untersucht. Dazu wurde aus den drei Items (5-stufige Likert-Skala) – „*Ich habe ein großes Interesse an biologischen Themen*“ (Faktorladung: 0,871); „*Ich habe ein großes Interesse an neurobiologischen Themen*“ (Faktorladung: 0,851); „*Ich habe ein großes Interesse, biologische Forschungsmethoden zu erproben oder anzuwenden*“ (Faktorladung: 0,810) – die Komponente „Ausgangsinteresse Biologie & Forschung“ gebildet (Cronbachs $\alpha = 0,796$). Aus den gebildeten Werten der Schüler für diese Komponente wurden drei Interessensgruppen gebildet, die anschließend in ihren Feedback-Bewertungen verglichen wurden (**Tabelle 9**).

Tabelle 9: Einteilung der Schüler in Abhängigkeit von der Bewertung der Komponente „Ausgangsinteresse Biologie & Forschung“

Ausgangsinteresse Biologie & Forschung	Komponentenbewertung
Nicht interessiert	1,0 – 2,0
Interessiert	2,1 – 3,9
Sehr interessiert	4,0 – 5,0

Bewertung des EPhys-Setups / der Neurosimulation

Für die Analysen des EPhys-Setups bzw. der Neurosimulation wurden drei Befragungsinstrumente eingesetzt, die sich an der Simulationsbewertung nach Chen et al. (2016), der Lab Motivation Scale nach Dohn et al. (2016) und dem Technology Acceptance Model ausgehend von Davis (1985) orientieren.

Untersuchungsdesign

Um den Einfluss der Hands-on Komponenten des EPhys-Setups auf die Bewertung der Testinstrumente überprüfen zu können, wurden die Schüler randomisiert in zwei Untersuchungsgruppen unterteilt (**Abbildung 16**). Die Versuchsgruppe (Setup-Gruppe) bilden die Schüler, die am EPhys-Setup (Neurosimulation & Hands-on Komponenten) gearbeitet haben (vgl. Kapitel 5.3.1). Die Kontrollgruppe (PC-Gruppe) bilden die Schüler, die an der Neurosimulation (ohne Hands-on

Komponenten) gearbeitet haben (vgl. Kapitel 5.3.6). Ist der Versuchsaufbau beider Gruppen gemeint, wird die Bezeichnung **Simulationsumsetzung** verwendet.

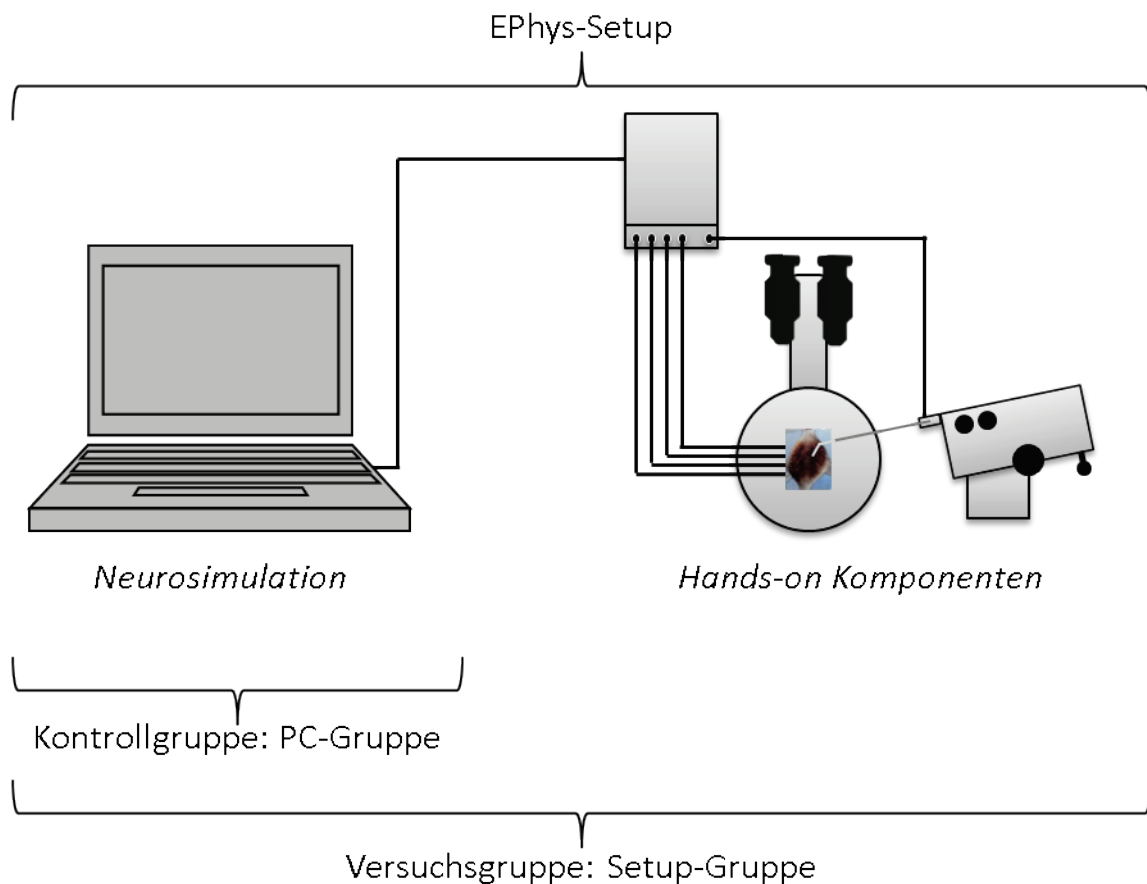


Abbildung 16: Untersuchungsdesign der beiden Simulationsumsetzungen.

Die Versuchsgruppe (Setup-Gruppe) bilden die Schüler, die am EPhys-Setup gearbeitet haben (Neurosimulation & Hands-on Komponenten). Die Kontrollgruppe (PC-Gruppe) bilden die Schüler, die an der Neurosimulation (ohne Hands-on Komponenten) gearbeitet haben. Die Beschreibung der Komponenten kann Abb. 9 (Kapitel 5.3.1) entnommen werden.

Neben der Unterscheidung der Simulationsumsetzung wurden die Testinstrumente weiterhin abhängig vom zugrunde liegenden Biologieinteresse der Schüler und ihren „Computerfähigkeiten“ untersucht (vgl. **Tabelle 10**). Mit dem Einzelitem „Wie interessiert bist du am Schulfach Biologie?“ (4-stufige Likert-Skala; 1 = nicht interessiert, 4 = sehr interessiert) wurden zur vergleichenden Betrachtung drei Gruppen zum Biologieinteresse gebildet: nicht interessiert, interessiert, sehr interessiert.

Des Weiteren wurde aus drei Einzelitems (4-stufige Likert-Skala; 1 = stimme überhaupt nicht zu, 4 = stimme voll zu) die Komponente „Computerfähigkeiten“ gebildet (Cronbachs $\alpha = 0,791$):

- 1) „Der Umgang mit Computern fällt mir persönlich leicht“
(Faktorladung: 0,867; nach Engel 2004);
- 2) „Mit der Bearbeitung von Aufgaben mit Computerprogrammen komme ich gut zurecht“
(Faktorladung: 0,895; angelehnt an Plenter 2004);
- 3) „Es fällt mir leicht, mithilfe von Computersoftware Inhalte zu lernen“
(Faktorladung: 0,766; angelehnt an Plenter 2004).

Die Bewertung der Komponente wurde in drei Fähigkeitsgruppen unterteilt: schlecht, mittel und gut.

Tabelle 10: Einteilung der untersuchten Gruppierungen
anhand der Simulationsumsetzung sowie der Bewertung der Schüler für die untersuchten unabhängigen Variablen (Biologieinteresse und Computerfähigkeiten).

Simulationsumsetzung	Biologieinteresse		Computerfähigkeiten	
	Gruppe	Werte	Gruppe	Werte
PC-Gruppe	Nicht interessiert	1	Schlecht	1,0–2,0
	Interessiert	2 & 3	Mittel	2,1–2,9
Setup-Gruppe	Sehr interessiert	4	Gut	3,0–4,0

Es gilt zu beachten, dass die weiblichen Schüler ($n = 149$; $MW = 3,49 \pm 0,67$) ein signifikant höheres Interesse an der Biologie aufweisen als die männlichen Schüler ($n = 86$; $MW = 3,19 \pm 0,91$; $*p = 0,022$; $r = 0,15$; *Mann-Whitney-U-Test*). Dagegen schätzen die männlichen Schüler ($MW = 3,39 \pm 0,62$) ihre „Computerfähigkeiten“ signifikant höher ein als die weiblichen Schüler ($MW = 2,99 \pm 0,60$; $***p < 0,001$; $r = 0,32$; *Mann-Whitney-U-Test*). Ein Einfluss auf die Ergebnisse wird durch eine prozentual möglichst gleichmäßige Verteilung vermindert (vgl. Anhang C) und zudem diskutiert.

Simulationsbewertung

In der Originalstudie von Chen et al. (2016) wurde eine simulierte Patientenpuppe im Medizinstudium eingesetzt und anhand von 12 Statements durch die Studierenden bewertet. Die Items umfassen folgende Themen: Theorieverständnis, Komfortlevel mit der Simulation, Idee vom realen Setting, Freude und Akzeptanz der Simulation, Akzeptanzlevel der Integration in den Kurs, Bedeutung der weiteren Verwendung der Simulation. Die Originalitems wurden ins Deutsche übersetzt und an die entwickelte Simulationsumsetzung angepasst (Beispielitem: „*Die Simulation¹ gab mir einen Eindruck von einem realen Elektrophysiologie-Setup*“). Zwei der originalen Statements sind nicht berücksichtigt, da sie inhaltlich als nicht relevant beurteilt worden sind („*The level and clinical aspect are proper for a science student and the tasks are within their capabilities*“; „*I would feel overwhelmed if the manikin deteriorated and died due to wrong diagnosis or intervention*“; Chen et al. 2016, S. 336).

Lab Motivation Scale

Dohn et al. (2016) untersuchten, wie Laborarbeit die Motivation bezüglich physiologischer Themen bei Studierenden beeinflusst. Dazu entwickelten sie die LMS, um die Ausprägungen des „situationalen Interesses“, die „Bereitschaft zum Engagement“ und die „Zuversicht im Hinblick auf das Verständnis“ zu untersuchen. Die eingesetzten 21 geschlossenen Aussagen wurden von den Autoren mit Faktoranalysen und Rasch-Modellen hinsichtlich ihrer Validität, Reliabilität und Faktorladungen auf die drei Komponenten („Interest“, „Effort“, „Self-efficacy“) überprüft. Die Originalitems wurden für die vorliegende Studie übersetzt und an die Simulationsumsetzung angepasst (Beispielitem: „*Das Arbeiten mit dem Setup² war spannend*“). „Interest“ ist als Motivationskomponente konzipiert, die sowohl affektive als auch kognitive Ebenen aufweist. Sie umfasst die situative Empfindung und Bewertung zu der praktischen Arbeit mit der Simulationsumsetzung. „Effort“ gehört zur extrinsischen Motivation und bezieht sich darauf, wie viel Mühe die Schüler in die Arbeit mit der Simulationsumsetzung investieren müssen bzw. bereit sind zu investieren. „Self-efficacy“ ist definiert als ein individuelles Urteil über die eigenen Fähigkeiten und bezieht sich für die vorliegende Arbeit vornehmlich auf den selbsteingeschätzten Lernerfolg – inhaltlich und praktisch. Drei der Originalitems

¹ Mit der Bezeichnung „*Simulation*“ innerhalb der Testinstrument-Items sind grundsätzlich beide Simulationsumsetzungen gemeint.

² Mit der Bezeichnung „*Setup*“ innerhalb der Testinstrument-Items sind grundsätzlich beide Simulationsumsetzungen gemeint.

der Komponente „Self-efficacy“ wurden nicht verwendet, da sie nicht auf das Konzept der Simulationsumsetzung anwendbar waren („*I feel confident to conduct the practical from a manual*“; „*I feel confident to write up the results to a laboratory report*“; „*I feel confident to write the conclusion to a laboratory report*“; Dohn et al. 2016, S. 315).

Technology Acceptance Model

Für eine vergleichende Untersuchung zur Akzeptanz der Simulationsumsetzung – mit und ohne Hands-on Komponenten – wurde ein Fragebogen entwickelt, der am TAM ausgerichtet ist (Davis 1989; Davis et al. 1989). Aus fünf publizierten Arbeiten, die eine Erhebung mittels der TAM Items durchgeführt haben, wurden die auf die Simulationsumsetzung anwendbaren Komponenten mit den zugehörigen Items übernommen (Davis 1985, 1989; Diwakar et al. 2014; Park 2009; Venkatesh und Bala 2008). Von fünf möglichen Komponenten wurden die Items für den Fragebogen ins Deutsche übersetzt (**Tabelle 11**). Die zwei Kernkomponenten des TAM – PEOU und PU – finden sich in allen fünf berücksichtigten Arbeiten und gehen zurück auf die Etablierung des Modells durch Davis (1989). Für PEOU wurden zehn Items verwendet, die vorwiegend von Davis (1985, 1989) formuliert wurden, aber auch neuere Items z. B. von Diwakar et al. (2014) kamen zum Einsatz. Von den sechs für die Komponente PU verwendeten Items, gehen drei auf Davis (1989) und drei auf Diwakar et al. (2014) zurück. Items zur Komponente „Relative Advantage“ wurden ebenfalls aus der Arbeit von Diwakar et al. (2014) übernommen. Alle drei Items zur Komponente „Attitude“ stammen aus der Arbeit von Park (2009). Die beiden Items zur Komponente PE sind von Venkatesh und Bala (2008) abgeleitet. PEOU ist definiert als der Grad, zu dem ein Schüler glaubt, dass die Verwendung der Simulationsumsetzung frei von kognitiver Anstrengung ist (Davis 1989; Diwakar et al. 2014; Park 2009). PU ist definiert als der Grad, zu dem ein Schüler glaubt, dass die Verwendung der Simulationsumsetzung sein Lernvermögen steigert (Diwakar et al. 2014; Park 2009). „Relative Advantage“ ist definiert als der Grad, zu dem etwas als besser wahrgenommen wird als das, was es ersetzt (Diwakar et al. 2014). „Attitude“ beschreibt die Einstellung gegenüber der Simulationsumsetzung. PE ist definiert als der Grad, zu dem die Arbeit mit der Simulationsumsetzung als erfreulich wahrgenommen wird – ohne Leistungskonsequenzen bei der Benutzung (Venkatesh und Bala 2008).

Tabelle 11: Komponenten des TAM und die dazugehörigen ausgewählten Items mit Angabe der Autoren.

Komponente	Item	Autoren
Perceived Ease of Use (PEOU)	Die Nutzung des virtuellen Setups ³ hat mich verwirrt.	Davis 1985
	Ich fand das virtuelle Setup umständlich zu bedienen.	Davis 1985
	Das Arbeiten mit dem virtuellen Setup war oft frustrierend.	Davis 1985
	Es fiel mir leicht zu lernen, wie man das virtuelle Setup bedient.	Davis 1989 Park 2009
	Ich fand das virtuelle Setup leicht zu benutzen.	Davis 1985/89 Park 2009 Venkatesh/Bala 2008
	Das Arbeiten mit dem virtuellen Setup forderte viel von meiner geistigen Leistung.	Davis 1985/89 Park 2009 Venkatesh/Bala 2008
	Das Arbeiten mit dem virtuellen Setup war klar und verständlich.	Davis 1985/89 Diwakar et al. 2014 Venkatesh/Bala 2008
	Ich fand es einfach, das virtuelle Setup dazu zu bringen, das zu tun, was ich wollte.	Davis 1985/89 Diwakar et al. 2014 Venkatesh/Bala 2008
	Die Messung und Analyse der Daten war einfach für mich.	Diwakar et al. 2014
	Ich hatte während der Durchführung Probleme mit dem virtuellen Setup.	Diwakar et al. 2014
Perceived Usefulness (PU)	Ich würde das virtuelle Setup in der Schule nützlich finden.	Davis 1989 Venkatesh/Bala 2008
	Das virtuelle Setup könnte meine Lernleistung in der Neurobiologie verbessern.	Davis 1989 Park 2009 Venkatesh/Bala 2008
	Das virtuelle Setup könnte es einfacher machen, Unterrichtsinhalte zu lernen.	Davis 1989 Park 2009
	Ich erreichte ein klares Verständnis von den Experimenten und den zugehörigen Inhalten.	Diwakar et al. 2014
	Es war einfach für mich, die Ergebnisse der Versuche zu interpretieren.	Diwakar et al. 2014
	Ich empfand die Anleitungen als hilfreich.	Diwakar et al. 2014
Relative Advantage	Ich hatte das Gefühl, an einem realen Mess-Setup zu arbeiten.	Diwakar et al. 2014
	Ich fand das virtuelle Setup motivierend.	Diwakar et al. 2014
	Ich fühlte mich bei der Durchführung der Experimente souverän.	Diwakar et al. 2014
	Die Verwendung des Setups würde das Lernen für die Neurobiologie einfacher machen.	Diwakar et al. 2014
	Ich fände es vorteilhaft, das virtuelle Setup zum Lernen zu benutzen.	Diwakar et al. 2014
Attitude	Ich bin dem virtuellen Setup gegenüber positiv eingestellt.	Park 2009
	Lernen mit dem virtuellen Setup ist eine sinnvolle Idee.	Park 2009
	Lernen mit dem virtuellen Setup ist eine gute Idee.	Park 2009
Perceived Enjoyment (PE)	Ich fand es unterhaltsam, das virtuelle Setup zu nutzen.	Venkatesh/Bala 2008
	Die praktische Nutzung des virtuellen Setups war ansprechend.	Venkatesh/Bala 2008
	Ich hatte Spaß dabei, das virtuelle Setup zu benutzen.	Venkatesh/Bala 2008

³ Mit der Bezeichnung „Setup“ innerhalb der Testinstrument-Items sind grundsätzlich beide Simulationsumsetzungen gemeint.

6.3 **Datenanalysen und Teststatistiken**

Für die quantitativen Erhebungen der Einstellungen gegenüber den Aussagen der Einzelitems wurden **Ordinal-** bzw. **Rangskalen nach Likert** (Likert-Skala, LS) verwendet, welche je nach Testinstrument 4- oder 5-stufig angelegt waren (Bortz und Döring 2006) . Die 4-stufigen Skalen schlossen dabei bewusst eine mittlere Ausprägung (neutral / weder noch) aus. Die negativen Ausprägungen (stimme nicht zu / trifft nicht zu / nicht wünschenswert) lagen stets links und wurden mit 1 codiert. Die positiven Ausprägungen (stimme voll zu / trifft voll zu / sehr wünschenswert) lagen stets rechts und wurden mit 4 bzw. 5 codiert. Für die Fälle, in denen Schüler Kreuze zwischen zwei Kästchen gesetzt oder zwei nebeneinander liegende Kästchen angekreuzt haben, wurden die Werte mit „Komma 5“ codiert.

Die Daten aus den Fragebögen wurden in Excel (2010, Microsoft Corporation) übertragen und für weitere Datenanalysen in SPSS 24 exportiert (IBM, SPSS, Inc., Chicago, Illinois, USA). Die Likert-Verteilungen von Einzelitems sind mit gestapelten Säulen dargestellt, welche auf 100 % normiert sind. Abhängige Daten werden als Steigungsdiagramm gezeigt. Mittelwert-, Verteilungs- und Anstiegsgraphen wurden mit Excel erstellt. Für die Ergebnisdarstellung von Komponenten wurde auf Box-Plot Grafiken zurückgegriffen, die mit dem Grafik-Editor von SPSS erstellt wurden. Werte, die mehr als 1,5 des Interquartilsabstands (IQR) über oder unter den Quartilen liegen, werden als Ausreißer betrachtet und als einzelne Kreise (o) markiert. Extreme Ausreißer liegen mehr als $3 \cdot \text{IQR}$ über oder unter den Quartilen und werden mit einzelnen Sternchen (*) markiert. Mittelwerte (MW) sind stets mit der zugehörigen Standardabweichung (SD) berechnet und die Mediane (Mdn) mit dem IQR als Streuungsmaß angegeben.

Für die Auswahl der Testinstrumente wurden die Daten zunächst auf **Normalverteilung** und **Varianzhomogenität** geprüft. Für die Normalverteilung wurde sowohl der **Kolmogorov-Smirnov-Test** als auch vergleichend der **Shapiro-Wilk-Test** angewendet, der sich für Stichproben kleiner 50 empfiehlt (Field 2009; Razali und Wah 2011). Die meisten Daten zeigten ein hoch signifikantes Ergebnis für die Tests, sodass eine Normalverteilung anzuzweifeln ist. Die Varianzhomogenität wurde mit dem **Levene-Test** überprüft (Levene 1960) und deutete in einigen Fällen auf eine nicht vorhandene Homogenität hin. Grundsätzlich sind die parametrischen t-Tests zwar relativ robust gegenüber der Verletzung dieser Kriterien, allerdings nur bis zu einem gewissen Grad und ab Stichproben größer 30 (Bortz 2005; Bortz und Döring 2006; Field 2009). Zudem sollten die Daten mindestens Intervall-skaliert vorliegen (Field 2009), was auf die getesteten Komponenten zwar zutrifft, allerdings ist es strittig, ob Likert-Skalen Ordinal- oder Intervall-skaliert vorliegen (Winter und Dodou 2010; Field 2009). Wenn

parametrische Testungen für Unterschiedshypothesen angewendet werden, müssen deren Kriterien für alle getesteten Gruppen erfüllt sein. Entsprechend wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit der Testergebnisse innerhalb der Arbeit in allen Fällen nicht-parametrische Testverfahren angewendet.

Für Unterschiedshypothesen **zweier unabhängiger Stichproben** wurde der **Mann-Whitney-U-Test** verwendet (Mann und Whitney 1947) und für Unterschiedshypothesen von **mehreren unabhängigen Stichproben** der **Kruskal-Wallis-Test** (Kruskal und Wallis 1952). Liegt im zweiten Fall ein signifikanter Unterschied vor, wird anschließend ein paarweiser Vergleich durchgeführt, um festzustellen, zwischen welchen Gruppen signifikante Unterschiede im Einzelnen vorliegen. Dazu wird in SPSS über einen **post-hoc-Test** der p -Wert mit einer **Bonferroni-Korrektur** angepasst. Auf diese Weise soll eine Alpha-Fehler-Kumulierung vermieden werden (Field 2018). Für die Testinstrumente der Simulationsumsetzungen wurde zusätzlich der **Jonckheere-Terpstra-Test** durchgeführt, um **lineare Trends** der Untersuchungsgruppen zu überprüfen (Jonckheere 1954; Terpstra 1952). Der Test berechnet, ob die Mediane der Gruppen in geordneter ansteigender oder absteigender Reihenfolge vorliegen (Field 2018). Die Daten von **zwei abhängigen Stichproben** wurden mit dem **Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test** auf statistische Unterschiede hin untersucht (Wilcoxon 1945).

Zur Beurteilung der **Signifikanzniveaus** wird die Einteilung nach klassischer Konvention verwendet (Bortz und Döring 2006):

$p < 0,05$	signifikant, *
$p < 0,01$	sehr signifikant, **
$p < 0,001$	höchst signifikant, ***

Zur genaueren Beurteilung von signifikanten Ergebnissen werden zusätzlich Effektstärken berechnet. Dazu wird ausgehend vom nicht-parametrischen Testverfahren eine **Effektstärke r** berechnet, welche u. a. von Field (2018) und Fritz et al. (2012) empfohlen wird. Die Formel geht zurück auf Rosenthal (1991):

$$r = \frac{z}{\sqrt{N}}$$

wobei z die von SPSS ausgegebene Teststatistik des z -Werts beschreibt und N der Stichprobenumfang der beiden getesteten Gruppen in Summe ist. Für den *Kruskal-Wallis-Test* wurden die Effektstärken immer bezogen auf die paarweisen Vergleiche berechnet. Die Beurteilung der **Effektstärken** orientiert sich an der von Cohen (1992, 1988) empfohlenen Einschätzung:

$r \geq 0,1$	kleiner Effekt
$r \geq 0,3$	mittlerer Effekt
$r \geq 0,5$	großer Effekt

Für die Auswertung der offenen Feedback-Fragen wurden die Aussagen einem Kategoriensystem zugeordnet, welches sich aus den gegebenen Antworten deduktiv ergab.

Hauptkomponentenanalysen (PCA): Im Rahmen der Feedback-Erhebungen bei den Schülern zu den SLT wurden Komponentenanalysen zum Zweck der Datenreduktion durchgeführt, um mit möglichst geringem Informationsverlust eine Übersicht über die Beurteilung der SLT zu erhalten. Für die Bewertung der verwendeten Simulationen wurden PCAs durchgeführt, um übergeordnete Komponenten der Bewertung zu finden, welche nicht direkt erhoben werden können, zum Beispiel „Enjoyment“ (Field 2009). In beiden Fällen wurde in SPSS eine explorative Komponentenanalyse angewendet. Als **Rotationsmethode** wurde **Varimax** gewählt, da sie ein bewährtes Vorgehen ist, das die Interpretation der Komponenten erleichtert. Die Varimax-Rotation versucht, die Verteilung der Ladungen innerhalb der Komponenten zu maximieren. Mit dieser Methode wird eine geringere Anzahl von Variablen in hohem Maße auf jede Komponente geladen, was zu besser interpretierbaren Clustern der Komponenten führt (Field 2009). Die abschließende Mittelwertberechnung der Komponenten wurde nur für Probanden durchgeführt, bei denen nicht mehr als 50 % der Items einen fehlenden Wert aufwiesen.

Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterium (KMO): Das Kriterium ist ein Maß dafür, ob sich ein Datensatz durch Komponenten darstellen lässt. Kaiser (1974) beschreibt einen Wert ab 0,5 als knapp annehmbar. Die vorliegende Arbeit orientiert sich an den Kriterien von Hutcheson und Sofroniou (1999):

0,5–0,7	mittelmäßig
0,7–0,8	gut
0,8–0,9	sehr gut
> 0,9	hervorragend

Stevens (2002) empfiehlt für **Komponentenladungen** kritische Schwellen, die abhängig von der Stichprobengröße sind und ausgehend von einem α -Level von 0,01 kalkuliert sind. Für Stichproben < 200 ergibt sich so eine Ladungsschwelle von 0,364. Für Stichproben < 100 ergibt sich eine Ladungsschwelle von 0,512. In der vorliegenden Arbeit sind die Stichproben der Komponentenanalysen > 190, womit es sich bei der gewählten kritischen Ladungsschwelle von 0,5 um sehr gut annehmbare Komponentenladungen handelt.

Die **Korrelationsmatrix** wurde dahingehend untersucht, dass jedes Item mit mindestens einem anderen Item einen Wert > 0,3 aufweist (Field 2018). War dies nicht der Fall, wurde das Item von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Für die **Anti-Image-Korrelation** galt das Kriterium, dass die Items mit sich selbst eine Korrelation > 0,5 aufweisen (Field 2018). Anderenfalls wurde das Item aus der weiteren Analyse ausgeschlossen. Waren alle Items, die diese Kriterien nicht erfüllten, aus der Analyse herausgenommen, wurden die Items hinsichtlich ihrer Ladung zur jeweiligen Komponente betrachtet. Items mit Ladungen < 0,5 oder Kreuzladungen > 0,45 wurden schrittweise aus der Analyse herausgenommen. Abschließend wurden die Items noch hinsichtlich ihrer inhaltlichen Zuordnung zur jeweiligen Komponente überprüft. Passten Items thematisch nicht zur Mehrheit der Items einer Komponente, wurden sie aus der Analyse herausgenommen.

Als **Maß der Konsistenz** (Reliabilität) der Komponenten wird **Cronbachs-Alpha** (α) verwendet. Die Beurteilung des α -Maßes gründet sich auf die Diskussion von Schecker (2014). Bortz und Döring (2006) nennen ein α -Maß von 0,8 als anzustrebenden Wert. Schmitt (1996) nennt $\alpha = 0,7$ als üblichen Schwellenwert. Allerdings hängt die Größe des α -Maßes auch stark von der Anzahl der Items ab. So kann je nach Kontextumgebung auch ein α -Maß von 0,5 als akzeptable Schwelle angesehen werden (Schecker 2014; Schmitt 1996).

Ergebnisse

Die Ergebnisdarstellung zeigt zunächst die Auswertungen der Lehrerbefragung. Ausgehend von der Ermittlung des experimentellen Anteils im Biologieunterricht der Schule wird der Bedarf an SLT zu unterschiedlichen Themenfeldern aufgezeigt. Abschließend wird die Rückmeldung der Lehrkräfte zu den drei SLT der Sekundarstufe II dargestellt. Das Feedback der Schüler schließt daran an und wird zusätzlich in Abhängigkeit von deren „Ausgangsinteresse“ betrachtet. Zusätzlich wird für die Schüler der retrospektive Lernzuwachs gezeigt. Für den SLT „Elektrophysiologie“ wurde für eine tiefergehende Betrachtung das offene Feedback ausgewertet. Darauf aufbauend werden die Ergebnisse der Erhebungen zur konzipierten Simulationsumsetzung des SLT „Elektrophysiologie“ dargestellt. Die Simulationsbewertungen nach Chen et al. (2016) sind sowohl als Einzelitems als auch in Form von Komponenten ausgewertet. Weitere Bestandteile der Analyse bilden die Ergebnisse der Lab Motivation Scale (Dohn et al. 2016) und des Technology Acceptance Model (Davis 1989).

7 Befragung der Lehrkräfte

Die Lehrkräfte wurden nach ihren experimentellen Umsetzungen zu verschiedenen Themenfeldern der Biologie in der Schule, nach ihrem Wunsch für Schülerlaborangebote sowie nach einer Rückmeldung zum besuchten SLT befragt.

7.1 Experimente im Schulunterricht

Für eine Einschätzung der experimentellen Umsetzung einzelner Themenfelder in der Schule wurden Lehrkräfte gefragt, zu welchen Themenfeldern sie Schülerversuche (**Abbildung 17**) und/oder Demonstrationsversuche (**Abbildung 18**) in der Schule durchführen. Für die neurobiologischen Themenbereiche der Sekundarstufe II fällt der prozentuale Anteil an Schülerversuchen und Demonstrationsversuchen relativ gering aus. 3 % der Lehrkräfte gaben an, dass sie Schülerversuche zum Gehirn durchführen, 5 % bieten dazu Demonstrationsversuche an. Für den Bereich der Nervenzellen gaben 15 % an, dass sie Schülerversuche und 18 %, dass sie Demonstrationsversuche durchführen. Im Bereich der elektrophysiologischen Humanbiologie werden von 17 % der Lehrkräfte

Schülerexperimente angeboten und von 3 % Demonstrationsversuche. Der Bereich Verhaltensbiologie weist für die Sekundarstufe II mit 35 % der Lehrkräfte, die experimentelle Schülerversuche durchführen, einen höheren Anteil auf. Inhalte zu den blau markierten Themenfeldern wurden im „Schülerlabor Neurowissenschaften“ für die Sekundarstufe I angeboten, jedoch nicht näher evaluiert. Der Lehreranteil, der dazu Schülerexperimente anbietet, liegt bei 41 % für „Zellbiologie: Histologie / Färbemethoden“, bei 80 % für „Sinnesphysiologie: Auge“ und bei 97 % für „Zellen und Gewebe“ (Abbildung 17).

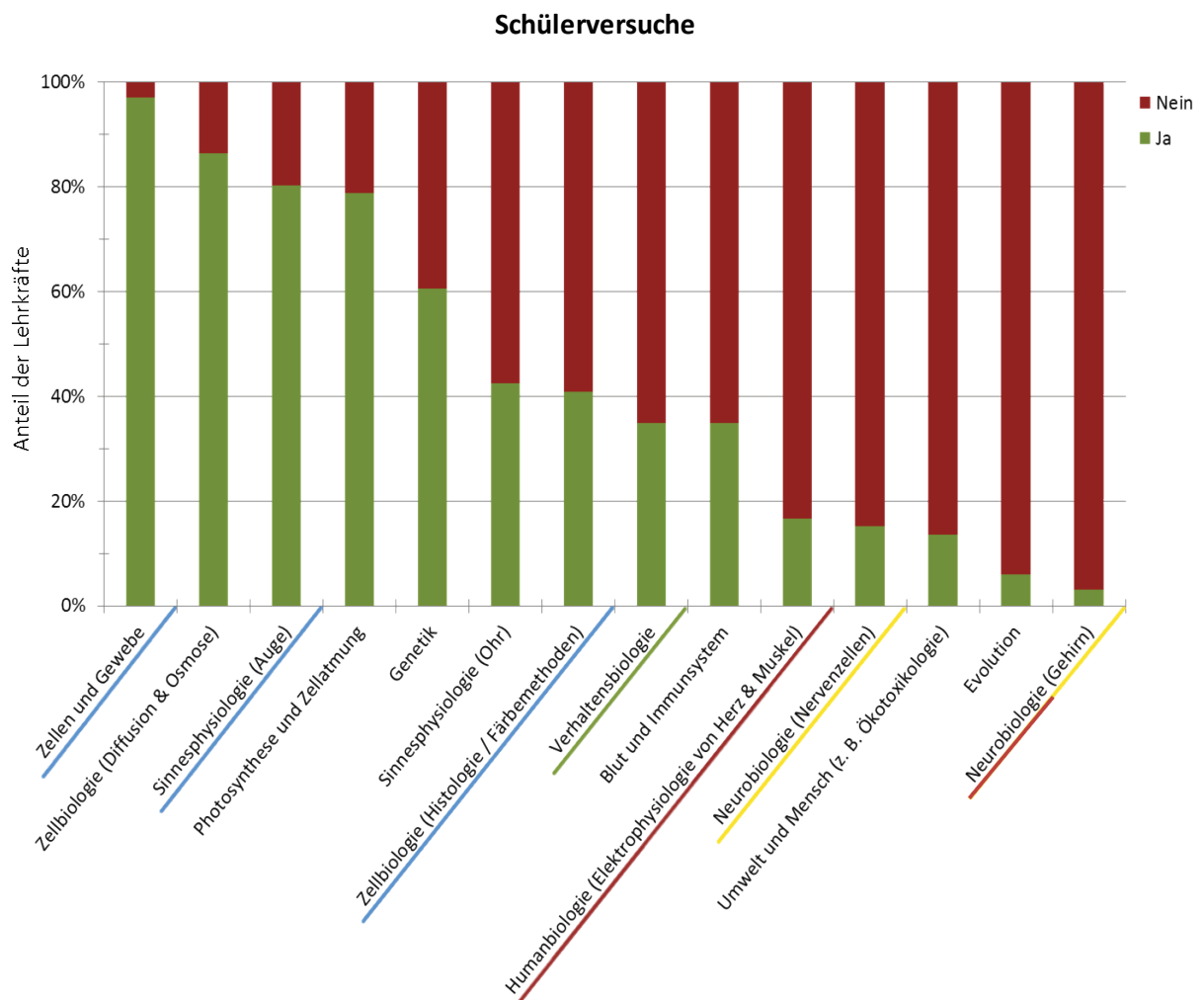


Abbildung 17: Prozentualer Anteil der befragten Lehrkräfte, die zu den genannten Themenbereichen Schülerexperimente in der Schule durchführen (Grün).

Unterstrichene Themenfelder wurden im „Schülerlabor Neurowissenschaften“ angeboten (Blau: angebotene Themenfelder der Sek. I, ohne Evaluierung; Grün: Themenfeld des SLT „Verhalten“; Rot: Themenfelder des SLT „Summenpotenzial“; Gelb: Themenfelder des SLT „Elektrophysiologie“. Item: „Zu welchen der oben genannten Themenbereiche führen Sie selbst Schülerexperimente in der Schule durch (Mehrfachnennungen möglich)?“. $n = 66$ ($W = 49$; $M = 17$).

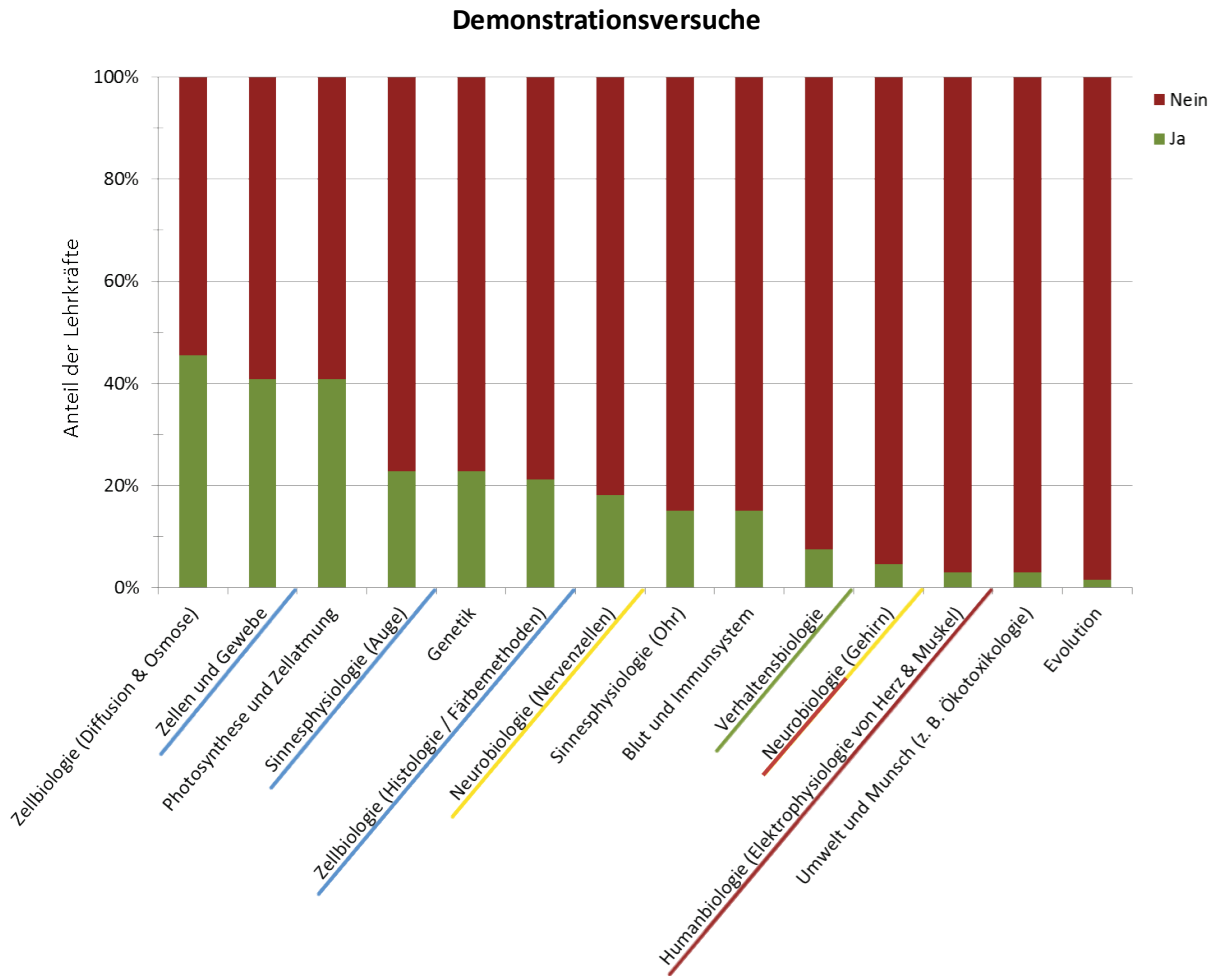


Abbildung 18: Prozentualer Anteil der befragten Lehrkräfte, die zu den genannten Themenbereichen Demonstrationsexperimente in der Schule durchführen (Grün).

Unterstrichene Themenfelder wurden im „Schülerlabor Neurowissenschaften“ angeboten (Blau: angebotene Themenfelder der Sek. I, ohne Evaluierung; Grün: Themenfeld des SLT „Verhalten“; Rot: Themenfelder des SLT „Summenpotenzial“; Gelb: Themenfelder des SLT „Elektrophysiologie“. Item: „Zu welchen der oben genannten Themenbereiche führen Sie selbst Demonstrationsexperimente in der Schule durch (Mehrfachnennungen möglich)?“. $n = 66$ ($W = 49$; $M = 17$).

Die thematischen Wünsche von Lehrkräften zu experimentellen Angeboten im Schülerlabor sind in **Abbildung 19** aufgeführt. Die Mittelwerte zu fast allen Themenfeldern liegen über 3 und damit im Bereich „wünschenswert“. Nur die Themenbereiche mit zellbiologischem Schwerpunkt weichen ab. Die Mittelwerte bei den Themenbereichen der Neurobiologie, die im „Schülerlabor Neurowissenschaften“ für die Sekundarstufe II angeboten werden, liegen zwischen $3,35 \pm 0,8$ und $3,51 \pm 0,81$ (4-stufige LS; 1 = nicht notwendig, 4 = sehr wünschenswert). Nur die Themenfelder Photosynthese und Genetik weisen noch höhere Werte auf.

Gewünschte Schülerlabortage

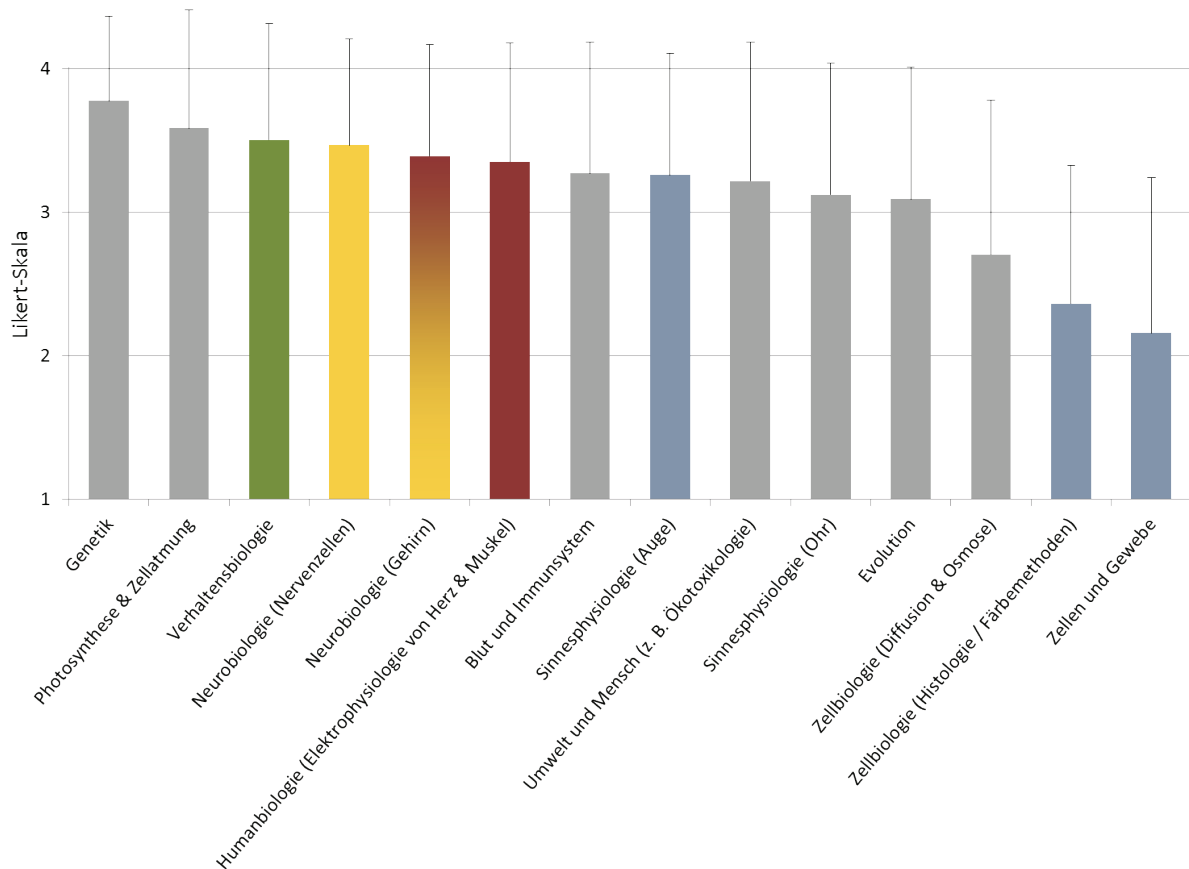


Abbildung 19: Gewünschte Schülerlabortage der befragten Lehrkräfte zu den Themenfeldern der Schulbiologie.

Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung. Farblich hervorgehobene Themenfelder wurden im „Schülerlabor Neurowissenschaften“ angeboten (Blau: angebotene Themenfelder der Sek. I, ohne Evaluierung; Grün: Themenfeld des SLT „Verhalten“; Rot: Themenfelder des SLT „Summenpotenzial“; Gelb: Themenfelder des SLT „Elektrophysiologie“). Item: „Für welche folgenden Themenbereiche wäre eine dauerhafte Ergänzung durch experimentelle Angebote im Schülerlabor wünschenswert?“. $n = 69$ ($W = 52$; $M = 17$). 4-stufige LS (1 = nicht notwendig, 4 = sehr wünschenswert).

7.2 Feedback-Erhebung der Lehrkräfte

Für die Rückmeldung der Lehrkräfte zu den drei SLT der Sekundarstufe II wurde eine entsprechende Feedback-Erhebung durchgeführt. Dazu erhielten die Lehrkräfte einen Fragebogen mit zehn Fragen zur Bewertung des Angebots, zu seinen Inhalten und Methoden und zur Integrationsmöglichkeit in den eigenen Unterricht (**Abbildung 20**).

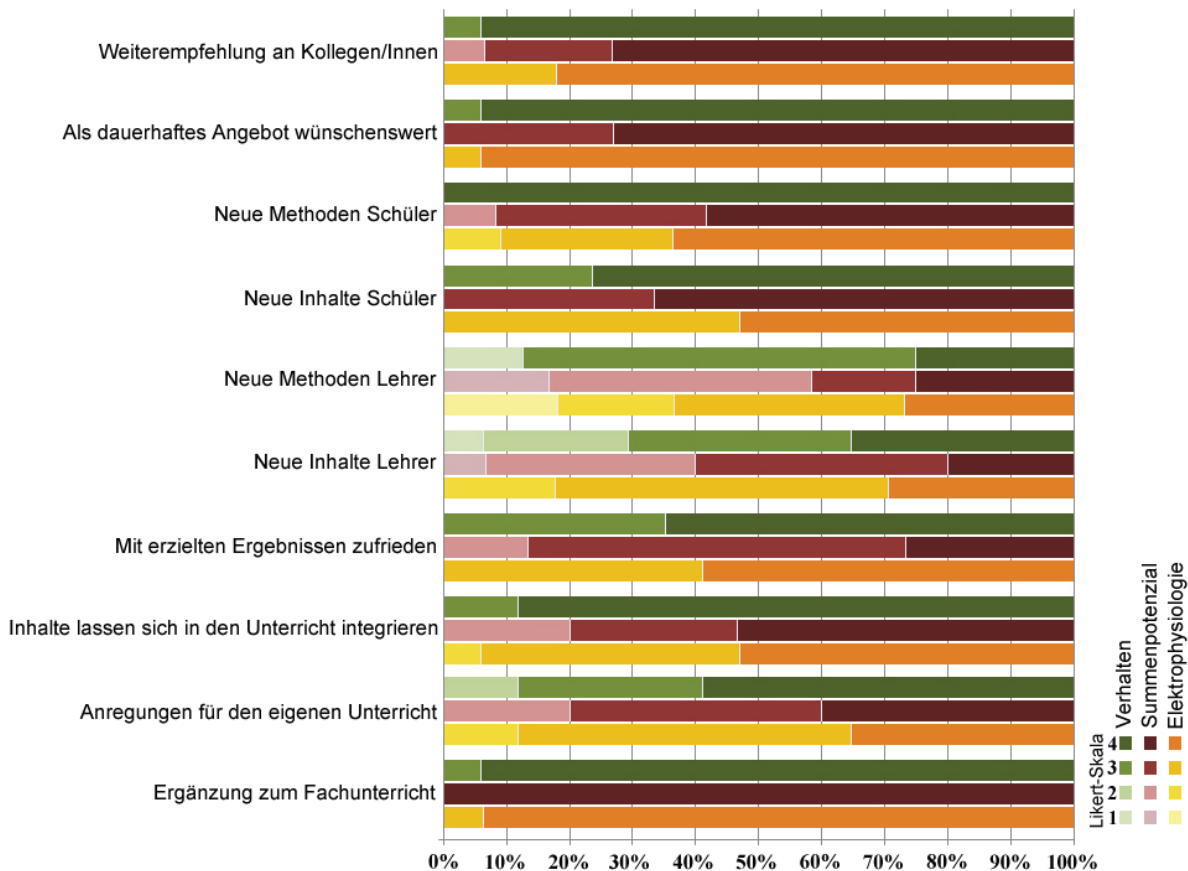


Abbildung 20: Feedback der Lehrkräfte zu den SLT.

$n = 49$ ($n_{\text{Verhalten}} = 17$; $n_{\text{Summenpotenzial}} = 15$; $n_{\text{Elektrophysiologie}} = 17$). 4-stufige LS (1 = trifft gar nicht zu, 4 = trifft voll zu).

Die Weiterempfehlung an Kollegen/Innen (MW = $3,67 \pm 0,62$ bis $3,94 \pm 0,24$; 4-stufige LS, 1 = trifft gar nicht zu, 4 = trifft voll zu), die Option eines dauerhaften Angebotes (MW = $3,73 \pm 0,46$ bis $3,94 \pm 0,24$) und die Ergänzung zum eigenen Fachunterricht (MW = $3,94 \pm 0,24$ bis $4,00 \pm 0,0$) wurden besonders hoch bewertet. Den Zugewinn an methodischen und inhaltlichen Kenntnissen schätzten die Lehrkräfte für ihre Schüler höher ein (MW = $3,50 \pm 0,67$ bis $4,00 \pm 0,0$) als für sich selbst (MW = $2,50 \pm 1,09$ bis $3,12 \pm 0,70$). Die Mittelwerte der weiteren sechs Items liegen über 3 und damit im positiven Bewertungsbereich (trifft zu bis trifft voll zu). Der SLT „Verhalten“ weist für alle Items den höchsten Mittelwert auf (Ausnahme: „Ergänzung zum Fachunterricht“). Die Integrationsmöglichkeit in den Unterricht ($p = 0,043$; *Kruskal-Wallis-Test*) und die Zufriedenheit mit den erzielten Ergebnissen ($p = 0,039$; *Kruskal-Wallis-Test*) wurden für die drei SLT unterschiedlich bewertet, im paarweisen Vergleich mit *Bonferroni-Korrektur* können aber keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Angeboten spezifiziert werden.

8 Befragung der Schüler

8.1 Feedback-Erhebung der Schüler

An insgesamt 26 SLT der Sekundarstufe II (12 x „Elektrophysiologie“, 11 x „Summenpotenzial“, 3 x „Verhalten“) wurden Feedback-Erhebungen inklusive der Erfassung des retrospektiven Lernzuwachses bei den Schülern durchgeführt, um die Qualität und Wirksamkeit der SLT beurteilen zu können sowie um Aussagen zu erhalten, die im weiteren Studienverlauf relevant sein könnten. Für eine übersichtliche und aussagekräftige Auswertung der 381 Rückmeldungen wurde zunächst eine PCA mit Varimax-Rotation durchgeführt, um Bewertungskomponenten zu bilden (**Tabelle 12**). Für diese Analyse konnten 24 von 29 erhobenen Items genutzt werden (Items ohne Komponentenbildung sind in der Fragebogendokumentation in Anhang B grau hervorgehoben). Der KMO-Wert der Analyse liegt im hervorragenden Bereich (0,919). Es wurden 5 Bewertungskomponenten identifiziert, wobei die Items auf die jeweiligen Komponenten mit Werten über 0,5 laden. Die internen Konsistenzen der Komponenten liegen mit α -Maßen von über 0,7 im guten Bereich. Die Komponente „Strukturierung von Inhalten und Anschaulichkeit“ (im Folgenden als „Strukturierung“ bezeichnet; 5 Items; $\alpha = 0,775$) wird gebildet aus Fragen zur Strukturierung, zum Einsatz von Medien, zur Anschaulichkeit, zur Vermittlung von schwierigen Inhalten und zu inhaltlichen Zusammenhängen. Die Komponente „Wissensvermittlung durch die Lehrperson“ (im Folgenden als „Wissensvermittlung“ bezeichnet; 5 Items; $\alpha = 0,806$) ermittelt Rückmeldungen zu Erklärungen und zur Anschaulichkeit von Lerninhalten sowie zur Wiederholung und Zusammenfassung von wichtigen Aspekten. Die „Lerndienliche Atmosphäre“ (4 Items; $\alpha = 0,779$) erhebt Bewertungen zu den Rückmeldungen der Betreuer gegenüber den Schülern sowie zur Wertschätzung und Stärkung bei Misserfolg. Die „Motivierende Atmosphäre“ (5 Items; $\alpha = 0,837$) bildet sich aus Fragen zur Abwechslung und Anregung, außerdem zur ermutigenden aktiven Teilnahme der Schüler. Die Komponente „Einblick in wissenschaftliche Forschungsarbeit“ (im Folgenden als „Einblick“ bezeichnet; 2 Items; $\alpha = 0,701$) erhebt die Einschätzung der Schüler, ob ein Einblick in aktuelle Forschung und wissenschaftliches Arbeiten erfolgte.

Tabelle 12: Hauptkomponentenanalyse (Korrelationsmatrix) der Feedback Items (LVE Goethe-Universität Frankfurt) der SLT.

KMO Kriterium: 0,919; n = 381.

Komponente	Item	Faktorladung	MW	SD
Strukturierung von Inhalten und Anschaulichkeit $\alpha: ,775$	Der vermittelte Stoff ist gut strukturiert.	,753	4,24	0,74
	Medien (z. B. Texte, Tafel, Folien oder Power-Point) werden in geeigneter Weise eingesetzt.	,694	4,51	0,73
	Inhalte werden anschaulich vermittelt.	,679	4,32	0,72
	In der Veranstaltung werden auch schwierige Inhalte verständlich erklärt.	,650	3,93	0,92
	In der Veranstaltung sind inhaltliche Zusammenhänge („roter Faden“) deutlich erkennbar.	,571	4,11	0,78
Wissensvermittlung durch die Lehrperson $\alpha: ,806$	Die Lehrperson erklärt neue Begriffe und Konzepte klar und nachvollziehbar.	,736	4,22	0,68
	Die Lehrperson hebt wichtige Aspekte besonders hervor.	,704	4,05	0,81
	Die Lehrperson gibt anschauliche Beispiele, die zum Verständnis des Lerninhalts / Stoffs beitragen.	,672	4,27	0,70
	Die Lehrperson fasst wichtige Aspekte zusammen.	,614	4,08	0,75
	Die Lehrperson wiederholt und vertieft besonders schwierige Aspekte ausreichend.	,610	3,76	0,94
Lerndienliche Atmosphäre $\alpha: ,779$	Die Betreuer geben hilfreiches Feedback auf die Beiträge der SchülerInnen.	,814	4,10	0,88
	Die Betreuer geben bei Verständnisschwierigkeiten hilfreiche Hinweise.	,800	4,22	0,82
	Die Betreuer stärken SchülerInnen bei Misserfolg im Lernprozess.	,596	3,41	0,98
	Die Betreuer achten darauf, eine wertschätzende Lehr-/ Lernatmosphäre herzustellen.	,531	4,11	0,87
Motivierende Atmosphäre $\alpha: ,837$	Die Betreuer erreichen, dass sich die meisten SchülerInnen aktiv an der Veranstaltung beteiligen.	,714	3,73	1,09
	Die Betreuer gestalten die Veranstaltung abwechslungsreich.	,688	3,84	1,01
	Die Lehrperson fesselt die SchülerInnen durch eine anregende und engagierte Vortragsweise.	,688	3,46	1,06
	Die Betreuer eröffnen den SchülerInnen Möglichkeiten, sich mit interessanten Inhalten eingehender zu beschäftigen.	,670	3,83	0,96
	Die Betreuer ermutigen die SchülerInnen bei der Aneignung schwieriger Inhalte.	,556	3,69	1,03
Einblick in wissenschaftliche Forschungsarbeit $\alpha: ,701$	Durch die Veranstaltung habe ich Einblick in aktuelle Forschung erhalten.	,859	3,63	1,03
	Durch die Veranstaltung verstehe ich besser, was wissenschaftliches Denken und Arbeiten ist.	,741	3,69	0,99

Dargestellt sind die Faktorladungen zur jeweiligen Komponente, Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) des jeweiligen Items sowie Cronbachs α der Komponenten. 5-stufige LS, 1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu. Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung; Paarweiser Fallausschluss.

Ausgehend von den 5 Bewertungskomponenten wurden die Rückmeldungen der Schüler für die SLT der Sekundarstufe II ausgewertet und miteinander verglichen (**Abbildung 21**). In der Box-Plot Darstellung wird die Verteilung der Bewertungen abhängig vom besuchten SLT deutlich.

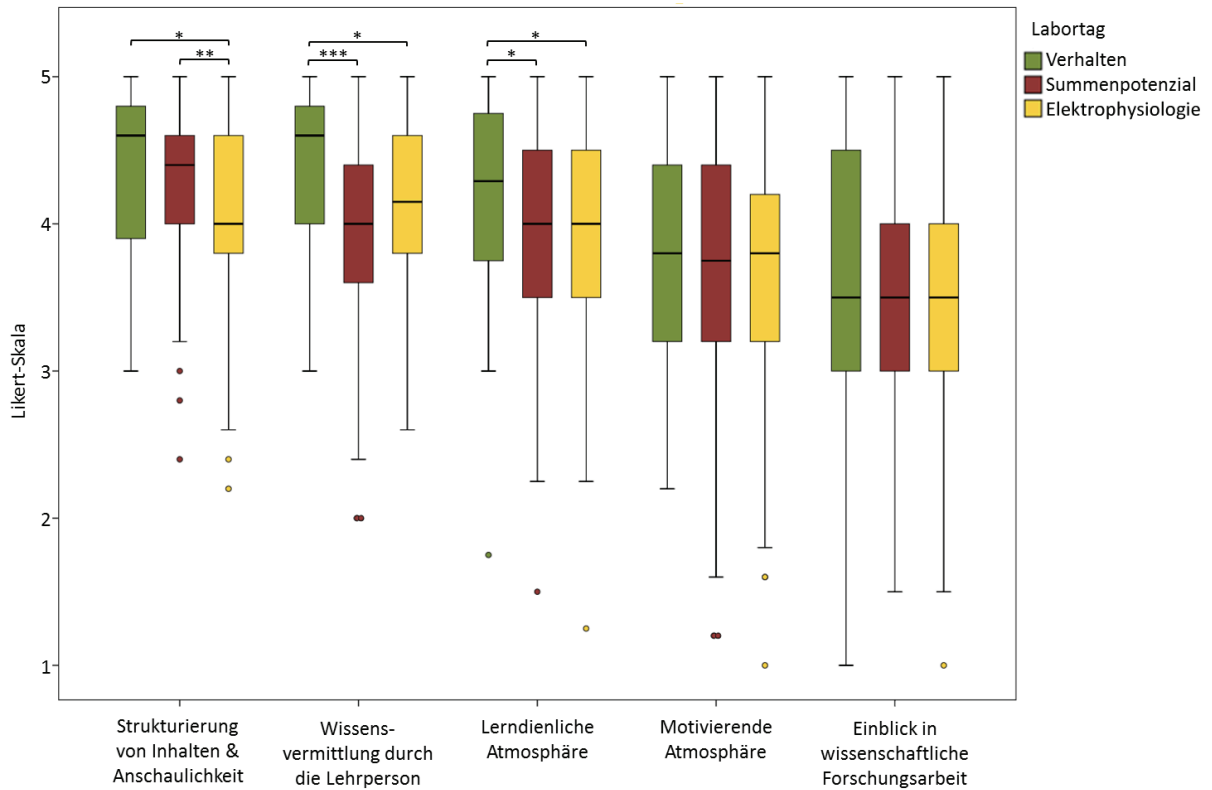


Abbildung 21: Bewertungskomponenten der befragten Schüler zu den SLT im Vergleich.

$n = 381$ ($n_{\text{Verhalten}} = 40$; $n_{\text{Summenpotenzial}} = 151$; $n_{\text{Elektrophysiologie}} = 190$); 5-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$ (Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc Vergleich und Bonferroni-Korrektur).

Insgesamt liegen die Bewertungen der 5 Komponenten für die drei SLT mit Mittelwerten über 3,6 im positiven Bewertungsbereich (5-stufige LS; 1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu). Die Komponente „Strukturierung“ wurde besonders hoch bewertet ($MW_{\text{Verhalten}} = 4,37 \pm 0,61$; $MW_{\text{Summenpotenzial}} = 4,32 \pm 0,49$; $MW_{\text{Elektrophysiologie}} = 4,12 \pm 0,60$). Für den SLT „Elektrophysiologie“ (Mdn = 4,00; IQR = 0,80) wurde sie im Vergleich zum SLT „Verhalten“ (Mdn = 4,60; IQR = 0,95; * $p = 0,017$; $r = 0,18$) und SLT „Summenpotenzial“ (Mdn = 4,40; IQR = 0,60; ** $p = 0,008$; $r = 0,16$) niedriger bewertet, liegt aber mit einem Mittelwert von 4,12 auch im positiven Bewertungsbereich. Die Bewertung für die Komponente „Wissensvermittlung“ fällt für den SLT „Verhalten“ am höchsten aus (Mdn = 4,60; IQR = 0,80) und zeigt signifikant höhere Werte im Vergleich zum SLT

„Summenpotenzial“ (Mdn = 4,00; IQR = 0,80; *** $p < 0,001$; $r = 0,30$) und zum SLT „Elektrophysiologie“ (Mdn = 4,15; IQR = 0,85; * $p = 0,012$, $r = 0,19$). Auch für die Komponente „Lerndienliche Atmosphäre“ liegt die Bewertung für den SLT „Verhalten“ (Mdn = 4,29; IQR = 1,00) am höchsten. Dieser Wert unterscheidet sich signifikant vom entsprechenden Wert des SLT „Summenpotenzial“ (Mdn = 4,00; IQR = 1,00; * $p = 0,011$; $r = 0,21$) und des SLT „Elektrophysiologie“ (Mdn = 4,00; IQR = 1,00; * $p = 0,029$; $r = 0,17$). Die Bewertung der Komponente „Motivierende Atmosphäre“ liegt leicht unter der Einschätzung zur „Lerndienlichen Atmosphäre“, weist aber dennoch hohe Mittelwerte auf ($MW_{\text{Verhalten}} = 3,75 \pm 0,79$; $MW_{\text{Summenpotenzial}} = 3,67 \pm 0,81$; $MW_{\text{Elektrophysiologie}} = 3,74 \pm 0,80$). Für die Komponente „Einblick“ zeigen sich die größten Spannweiten (3,5–4,0) und die niedrigsten Mittelwerte. Im Mittel liegen diese noch im positiven Bewertungsbereich ($MW_{\text{Verhalten}} = 3,71 \pm 0,98$; $MW_{\text{Summenpotenzial}} = 3,63 \pm 0,90$; $MW_{\text{Elektrophysiologie}} = 3,66 \pm 0,86$).

Für eine Analyse der Abhängigkeit von weiteren Variablen wurden Unterschiede zwischen den Geschlechtern (Weiblich/Männlich) und den Kursformen (Leistungskurs/Grundkurs) untersucht (**Tabelle 13**). Die Untersuchung zeigt, dass für die Bewertungskomponente „Strukturierung“ keine Unterschiede in Abhängigkeit von den Vergleichsvariablen auftreten. Geschlechterunterschiede in der Bewertung der Komponenten finden sich nur für den SLT „Verhalten“ bei der „Wissensvermittlung“ und für den SLT „Elektrophysiologie“ bei der „Lerndienlichen Atmosphäre“. Bei den Grundkursschülern wurden im Vergleich zu den Leistungskursschülern häufiger höhere Werte bei der Bewertung einzelner Komponenten gemessen. In der Gesamtbetrachtung finden sich hier signifikante Unterschiede für die „Wissensvermittlung“ sowie für die „Lerndienliche Atmosphäre“ und „Motivierende Atmosphäre“. Ein Einfluss der gefundenen Geschlechter- und Kursformunterschiede auf die dargestellten Signifikanzen in den Bewertungskomponenten wird aufgrund der Verteilungen ausgeschlossen. Dies ergibt sich daraus, dass der Anteil der weiblichen Schüler (58–66 %) bzw. der Anteil der Grundkursschüler (17–25 %) zwischen den einzelnen SLT nur geringfügig schwankt (vgl. Anhang C).

Tabelle 13: Abhängigkeit der Bewertungskomponenten von den Variablen Geschlecht und Kursform in Bezug zum SLT und im Gesamtüberblick.

$n_{\text{Verhalten}} = 40$; $n_{\text{Summenpotenzial}} = 151$; $n_{\text{Elektrophysiologie}} = 190$. Signifikanzniveaus: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$ (Mann-Whitney-U-Test).

SLT	Vergleichsvariable	Strukturierung von Inhalten & Anschaulichkeit	Wissensvermittlung durch die Lehrperson	Lerndienliche Atmosphäre	Motivierende Atmosphäre	Einblick in wissenschaftliche Forschungsarbeit
Gesamt	Geschlecht	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
	Kursform	n. s.	GK > LK * $p = 0,026$ $r = 0,11$	GK > LK ** $p = 0,001$ $r = 0,17$	GK > LK *** $p < 0,001$ $r = 0,20$	n. s.
Verhalten	Geschlecht	n. s.	W > M * $p = 0,047$ $r = 0,31$	n. s.	n. s.	n. s.
	Kursform	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
Summenpotenzial	Geschlecht	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
	Kursform	n. s.	n. s.	n. s.	GK > LK * $p = 0,025$ $r = 0,19$	n. s.
Elektrophysiologie	Geschlecht	n. s.	n. s.	M > W * $p = 0,049$ $r = 0,14$	n. s.	n. s.
	Kursform	n. s.	n. s.	GK > LK *** $p < 0,001$ $r = 0,24$	GK > LK *** $p < 0,001$ $r = 0,25$	n. s.

M: Männlich, W: Weiblich, GK: Grundkurs, LK: Leistungskurs. Verhalten (n): W = 23; M = 17; LK = 30; GK = 10. Summenpotenzial (n): W = 93; M = 58; LK = 125; GK = 26. Elektrophysiologie (n): W = 126; M = 64; LK = 158; GK = 32.

Zusätzlich wurde untersucht, ob sich die drei SLT hinsichtlich der folgenden Variablen unterscheiden: Komponente „Ausgangsinteresse an Biologie und Forschung“ (im Folgenden „Ausgangsinteresse“), die Veränderung des Interesses (Item: *Der heutige Tag hat mein Interesse positiv verändert*) oder die Schulnotenbewertung (**Tabelle 14**). Mit dem *Kruskal-Wallis-Test* konnten diesbezüglich keine signifikanten Unterschiede gefunden werden. Die Schüler zeigen im Mittel ein hohes „Ausgangsinteresse“ (MW = $3,86 \pm 0,85$; n = 381, 5-stufige LS). Die Bewertung der Interessensänderung liegt für die drei SLT über 3 und somit im neutralen bis positiven Bewertungsbereich (stimme zu bis stimme voll zu; n = 381). Die Schulnotenbewertung der Schüler liegt im Mittel bei $2,09 \pm 0,64$ (n = 381). Bezüglich der Abhängigkeit dieser drei Variablen (**Tabelle 14**) von weiteren Faktoren wurde ermittelt, dass die Leistungskurschüler ein höheres „Ausgangsinteresse“ ($3,93 \pm 0,80$; n = 313) aufweisen als die Grundkurschüler ($3,51 \pm 0,98$; n = 68; ** $p = 0,001$; $r = 0,17$; *Mann-Whitney-U-Test*), die Grundkurschüler jedoch eine größere Interessensänderung zeigen ($3,75 \pm 1,01$; n = 68) als die

Leistungskursschüler ($3,46 \pm 1,03$; $n = 313$, $*p = 0,049$; $r = 0,10$; *Mann-Whitney-U-Test*). Geschlechterspezifische Unterschiede konnten diesbezüglich nicht gefunden werden.

Tabelle 14: Vergleich der Komponente „Ausgangsinteresse Biologie & Forschung“, der Veränderung des Interesses (Item: „Der heutige Tag hat mein Interesse positiv verändert“) und der Schulnote für den jeweiligen SLT.

$n = 381$ ($n_{\text{Verhalten}} = 40$; $n_{\text{Summenpotenzial}} = 151$; $n_{\text{Elektrophysiologie}} = 190$). 5-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu); Schulnoten 1–6.

SLT	Ausgangsinteresse Biologie & Forschung MW \pm SD	Veränderung des Interesses MW \pm SD	Schulnote MW \pm SD
Verhalten	3,69 \pm 0,81	3,30 \pm 0,99	2,14 \pm 0,72
Summenpotenzial	3,93 \pm 0,80	3,57 \pm 1,02	2,05 \pm 0,61
Elektrophysiologie	3,84 \pm 0,89	3,52 \pm 1,04	2,12 \pm 0,68

Die grundsätzliche Betrachtung der Bewertungen zu den drei SLT wurde bereits anhand der **Abbildung 21** dargestellt. Abhängig von der Komponente „Ausgangsinteresse“ wurde die Bewertung der Schüler für die drei SLT noch einmal im Einzelnen betrachtet (**Abbildung 22–24**). Abhängig von den gebildeten Interessensgruppen zeigen sich nur wenige Unterschiede in den Bewertungen zu den SLT. So konnten für den SLT „Verhalten“ keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit vom „Ausgangsinteresse“ ermittelt werden (**Abbildung 22**). Höhere Bewertungen zeigen sich bei den sehr interessierten Schülern am SLT „Summenpotenzial“ für die „Wissensvermittlung“ (Mdn = 4,00; IQR = 0,60) im Vergleich zu den interessierten Schülern (Mdn = 3,80; IQR = 0,80; $*p = 0,031$; $r = 0,21$) (**Abbildung 23**). Außerdem zeigen die sehr interessierten Schüler am SLT „Elektrophysiologie“ für die „Strukturierung“ (Mdn = 4,20; IQR = 0,60) signifikant höhere Werte als die interessierten Schüler (Mdn = 4,00; IQR = 0,80; $**p = 0,007$; $r = 0,23$) (**Abbildung 24**).

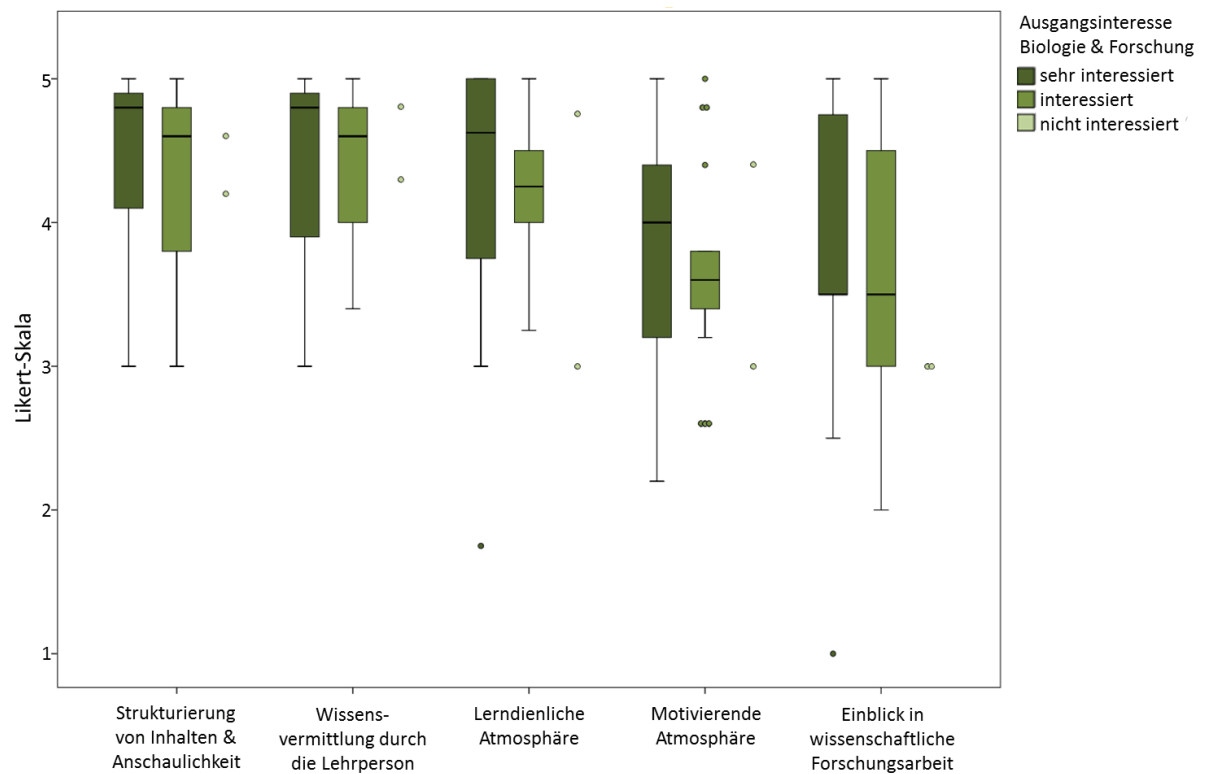


Abbildung 22: Bewertungskomponenten der befragten Schüler zum SLT „Verhalten“ in Abhängigkeit vom „Ausgangsinteresse an Biologie und Forschung“.

Gruppeneinteilung abhängig von der Bewertung der Komponente (sehr interessiert: 5,00–4,00; interessiert: 3,99–2,10; nicht interessiert: 1,00–2,09). $n = 40$ ($n_{\text{sehr interessiert}} = 19$; $n_{\text{interessiert}} = 19$; $n_{\text{nicht interessiert}} = 2$). 5-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$ (Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc Vergleich und Bonferroni-Korrektur).

Weitere Signifikanzen konnten nicht gefunden werden. Eine tendenzielle Abnahme der Bewertung der Komponenten Richtung nicht interessierter Schüler kann aber an einigen Stellen festgestellt werden. Beispielsweise liegt die Bewertung des „Einblicks“ für alle drei SLT im Mittelwert bei den nicht interessierten Schülern am niedrigsten ($MW_{\text{Verhalten}} = 3,00 \pm 0$; $MW_{\text{Summenpotenzial}} = 3,08 \pm 0,58$; $MW_{\text{Elektrophysiologie}} = 3,40 \pm 0,77$). Besonders am SLT „Summenpotenzial“ kann die Abnahme in fast allen Komponenten im Mittel festgestellt werden.

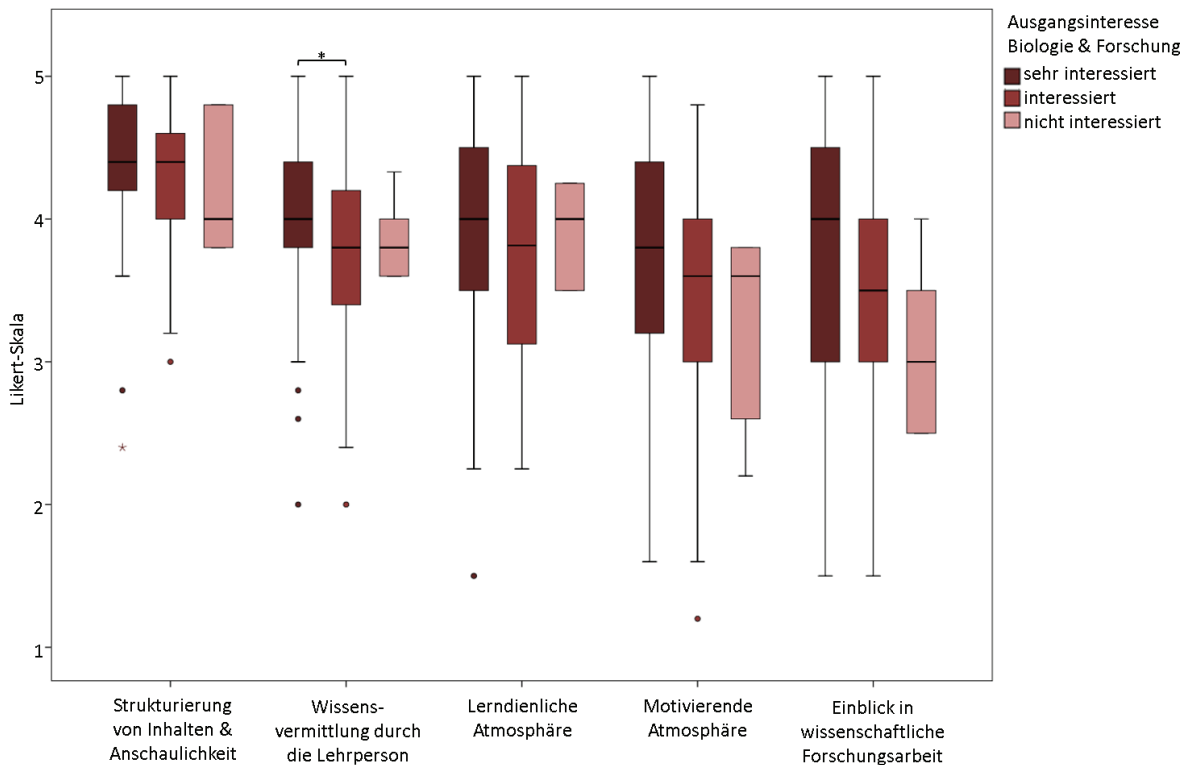


Abbildung 23: Bewertungskomponenten der befragten Schüler zum SLT „Summenpotenzial“ in Abhängigkeit vom „Ausgangsinteresse an Biologie und Forschung“.

Gruppeneinteilung abhängig von der Bewertung der Komponente (sehr interessiert: 5,00 - 4,00; interessiert: 3,99 - 2,10; nicht interessiert: 1,00 - 2,09). $n = 151$ ($n_{\text{sehr interessiert}} = 84$; $n_{\text{interessiert}} = 61$; $n_{\text{nicht interessiert}} = 6$). 5-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$ (Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc Vergleich und Bonferroni-Korrektur).

Ebenfalls abhängig von der Komponente „Ausgangsinteresse“ zeigen sich Unterschiede bezüglich der Variablen Interessensänderung und Benotung (vgl. **Tabelle 14**). Ein Unterschied in der Benotung findet sich für den SLT „Summenpotenzial“ (* $p = 0,031$; Kruskal-Wallis-Test), der aber mit einem paarweisen Vergleich nicht genauer spezifiziert werden kann. An den SLT „Elektrophysiologie“ (MW = $3,82 \pm 0,92$) und „Summenpotenzial“ (MW = $3,94 \pm 0,92$) zeigen die sehr interessierten Schüler eine deutlich höhere Bewertung für ihre Interessensänderung im Vergleich zu den interessierten Schülern (MW_{Elektrophysiologie} = $3,10 \pm 1,05$; *** $p < 0,001$; $r = 0,35$; MW_{Summenpotenzial} = $3,18 \pm 0,89$; *** $p < 0,001$; $r = 0,34$; Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc Vergleich und Bonferroni-Korrektur) und nicht interessierten Schülern (MW_{Elektrophysiologie} = $2,90 \pm 1,10$; ** $p = 0,017$; $r = 0,25$; MW_{Summenpotenzial} = $2,33 \pm 1,21$; ** $p = 0,003$; $r = 0,34$; Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc Vergleich und Bonferroni-Korrektur).

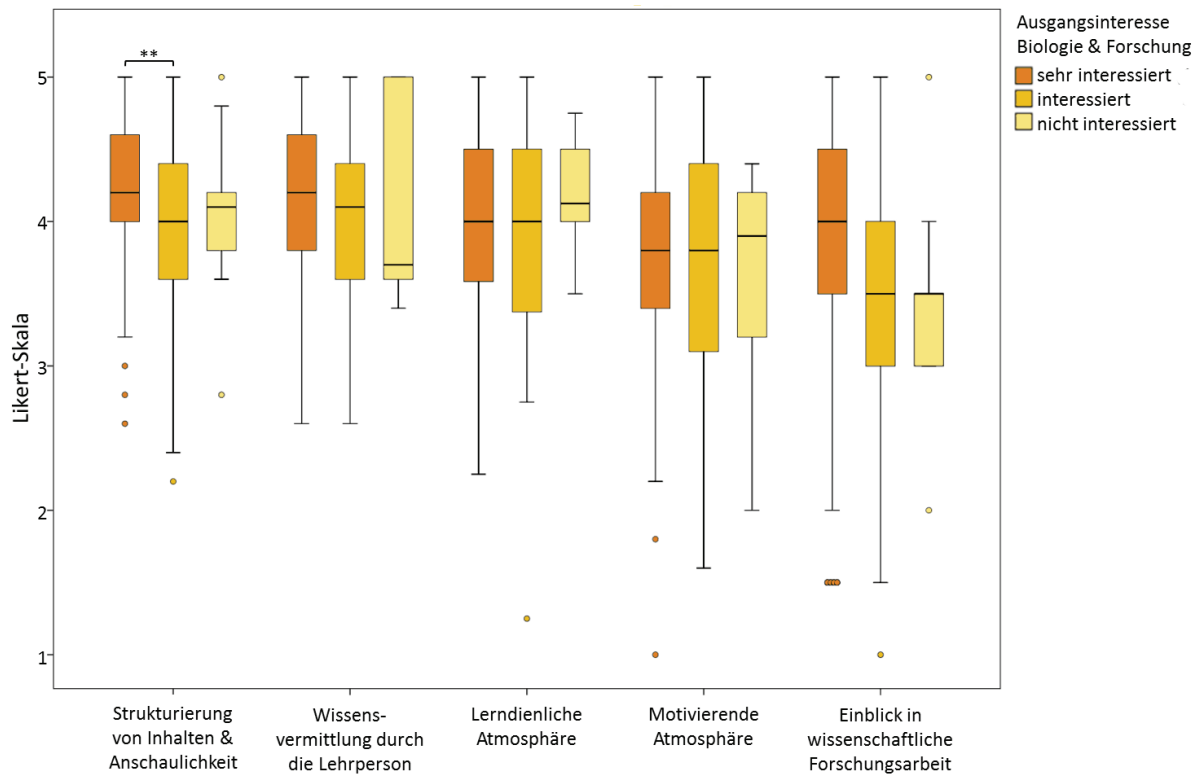


Abbildung 24: Bewertungskomponenten der befragten Schüler zum SLT „Elektrophysiologie“ in Abhängigkeit vom „Ausgangsinteresse an Biologie und Forschung“.

Gruppeneinteilung abhängig von der Bewertung der Komponente (sehr interessiert: 5,00 - 4,00; interessiert: 3,99 - 2,10; nicht interessiert: 1,00 - 2,09). $n = 190$ ($n_{\text{sehr interessiert}} = 112$; $n_{\text{interessiert}} = 68$; $n_{\text{nicht interessiert}} = 10$). 5-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: $*p < 0,05$; $**p < 0,01$; $***p < 0,001$ (Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc Vergleich und Bonferroni-Korrektur).

8.2 Retrospektive Prä-Post-Erhebung des Lernzuwachses

Die Schüler wurden retrospektiv zu ihrer Selbsteinschätzung vor (prä) und nach (post) dem SLT bezüglich des Wissens über die Thematik, ihrer Anwendungszuversicht der Inhalte und ihres Interesses am Thema befragt. Anhand der **Abbildung 25** werden zunächst die Mittelwerte und Unterschiede in der Verteilung zwischen den SLT betrachtet.

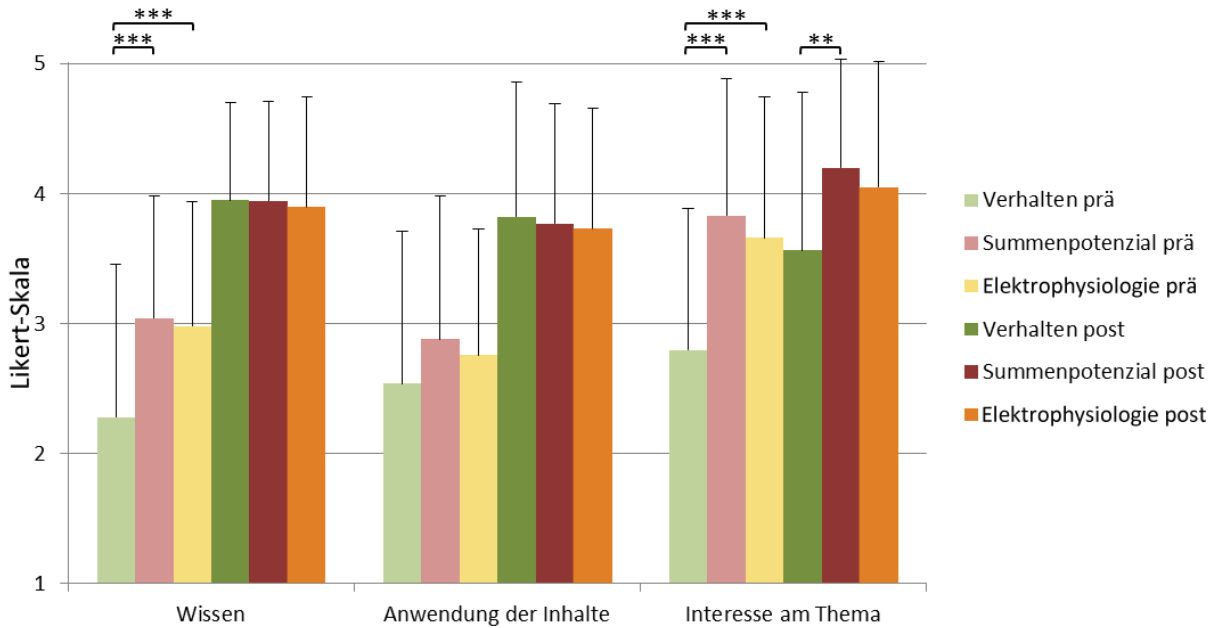


Abbildung 25: Mittelwertvergleiche der retrospektiven Prä-Post-Erhebung in Bezug auf Wissen über die Thematik, Anwendungszuversicht der Inhalte und Interesse am Thema für die SLT.

$n = 381$ ($n_{\text{Verhalten}} = 40$; $n_{\text{Summenpotenzial}} = 151$; $n_{\text{Elektrophysiologie}} = 190$). 5-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$ (Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc Vergleich und Bonferroni-Korrektur).

Die Prä-Werte sind für die Einschätzung des Interesses an allen SLT am höchsten ($MW_{\text{Verhalten}} = 2,79 \pm 1,10$; $MW_{\text{Summenpotenzial}} = 3,83 \pm 1,06$; $MW_{\text{Elektrophysiologie}} = 3,66 \pm 1,09$; 5-stufige LS, 1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu). Für die SLT „Summenpotenzial“ ($MW = 4,20$) und „Elektrophysiologie“ ($MW = 4,05$) liegen die höchsten Post-Werte ebenfalls beim Interesse am Thema. Für den SLT „Verhalten“ finden sich der höchste Post-Wert ($MW = 3,95 \pm 0,76$) sowie der niedrigste Prä-Wert ($MW = 2,28 \pm 1,19$) im Bereich Wissen. Für die SLT „Summenpotenzial“ und „Elektrophysiologie“ liegt der niedrigste Prä-Wert ($MW_{\text{Summenpotenzial}} = 2,88 \pm 1,11$; $MW_{\text{Elektrophysiologie}} = 2,76 \pm 0,97$) ebenso wie der niedrigste Post-Wert ($MW_{\text{Summenpotenzial}} = 3,77 \pm 0,93$; $MW_{\text{Elektrophysiologie}} = 3,73 \pm 0,92$) bei der Anwendungszuversicht. Für den SLT „Verhalten“ liegt der niedrigste Post-Wert beim Interesse am Thema ($MW = 3,56 \pm 1,23$). Die beiden SLT „Elektrophysiologie“ und „Summenpotenzial“ weisen im Vergleich keine signifikanten Unterschiede auf. Der SLT „Verhalten“ liegt bei einzelnen Werten unter den Werten der beiden anderen SLT. Die Schüler schätzen ihr Prä-Wissen für den Bereich der Verhaltensbiologie deutlich geringer ein (***) $p < 0,001$; $r_{\text{Summenpotenzial}} = 0,29$; $r_{\text{Elektrophysiologie}} = 0,25$). Im Post-Wissen unterscheiden sich die Angaben nicht mehr. Entsprechend ist der Anstieg des eingeschätzten Wissens am SLT „Verhalten“ am höchsten (vgl. **Abbildung 26**). Auch das Interesse am Thema liegt prä für den SLT „Verhalten“ signifikant unter

den beiden anderen SLT ($***p < 0,001$; $r_{\text{Summenpotenzial}} = 0,36$; $r_{\text{Elektrophysiologie}} = 0,28$). Der Unterschied zum SLT „Summenpotenzial“ bleibt im Post-Interesse signifikant ($**p = 0,009$; $r = 0,21$). Im Vergleich zum SLT „Elektrophysiologie“ liegt tendenziell ebenfalls ein Unterschied vor ($p = 0,066$; $r = 0,15$).

Für eine erneute Analyse der Abhängigkeit von weiteren Variablen wurden auch hier Unterschiede zwischen den Geschlechtern (Weiblich/Männlich) und den Kursformen (Leistungskurs/Grundkurs) untersucht (**Tabelle 15**). Bei der Post-Bewertung treten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der getesteten Gruppen auf. Die weiblichen Schüler gaben ein höheres Prä-Interesse für die Themen des SLT „Elektrophysiologie“ an als die männlichen Schüler.

Tabelle 15: Abhängigkeit der retrospektiven Prä-Post-Erhebung von den Variablen Geschlecht und Kursform in Bezug zum SLT und im Gesamtüberblick.

$n_{\text{Verhalten}} = 40$; $n_{\text{Summenpotenzial}} = 151$; $n_{\text{Elektrophysiologie}} = 190$. Signifikanzniveaus: $*p < 0,05$; $**p < 0,01$; $***p < 0,001$ (Mann-Whitney-U-Test).

SLT	Vergleichsvariable	Wissen		Anwendung		Interesse	
		Prä	Post	Prä	Post	Prä	Post
Gesamt	Geschlecht	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>
	Kursform	LK > GK $**p = 0,007$ $r = 0,14$	<i>n. s.</i>	LK > GK $*p = 0,011$ $r = 0,13$	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>
Verhalten	Geschlecht	M > W $**p = 0,003$ $r = 0,48$	<i>n. s.</i>	M > W $*p = 0,014$ $r = 0,39$	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>
	Kursform	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>
Summenpotenzial	Geschlecht	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>
	Kursform	LK > GK $*p = 0,045$ $r = 0,16$	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>
Elektrophysiologie	Geschlecht	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	W > M $*p = 0,022$ $r = 0,17$	<i>n. s.</i>
	Kursform	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>

M: Männlich, W: Weiblich, GK: Grundkurs, LK: Leistungskurs. Verhalten (n): W = 23; M = 17; LK = 30; GK = 10. Summenpotenzial (n): W = 93; M = 58; LK = 125; GK = 26. Elektrophysiologie (n): W = 126; M = 64; LK = 158; GK = 32.

Weitere Geschlechterunterschiede finden sich für das Prä-Wissen und die Prä-Anwendungszuversicht. Beide wurden von den männlichen Schülern am SLT „Verhalten“ höher

eingeschätzt als von den weiblichen Schülern. Die Leistungskursschüler schätzten sowohl in der Gesamtbetrachtung als auch für den SLT „Summenpotenzial“ ihr Prä-Wissen höher ein als die Grundkursschüler. Außerdem bewerteten sie in der Gesamtbetrachtung ihre Prä-Anwendungszuversicht höher. Ein Einfluss der Geschlechter- und Kursformunterschiede auf die signifikant unterschiedlichen Einschätzungen der SLT in der Prä-Post-Erhebung kann aufgrund der gleichmäßigen Verteilungen ausgeschlossen werden (vgl. Ausführung S. 112 sowie Anhang C).

Die Selbsteinschätzung der Schüler hinsichtlich der Bewertung ihres Wissens, ihrer Anwendungszuversicht und ihres Interesses am Thema liegt für die drei SLT post signifikant höher als prä (vgl. **Tabelle 16**). Für eine detaillierte Betrachtung des Zuwachses der Variablen der retrospektiven Erhebung (**Abbildung 25**) wurden die Schüler – abhängig vom angegebenen Prä-Wert der jeweiligen Variablen – in drei Gruppen unterteilt:

- Gruppe 1 – Likert-Werte 1 und 2;
- Gruppe 2 – Likert-Wert 3;
- Gruppe 3 – Likert-Werte 4 und 5.

Der Anstieg zum Post-Wert der Gruppe wurde anhand des jeweiligen Mittelwerts berechnet (**Abbildung 26**). Die Einzelwerte der **Abbildung 26** sind in **Tabelle 16** aufgeführt. In den Bereichen Anwendungszuversicht und Wissen liegen die Prä-Werte im Vergleich zum Interesse niedriger (vgl. **Abbildung 25**). Innerhalb der einzelnen Gruppen (1 bis 3) sind die Prä-Post-Anstiege bei allen SLT in ihrer Größenordnung vergleichbar. Hierbei tritt eine themenspezifische Unterscheidung hinsichtlich der SLT nicht auf. Insbesondere bei der Gruppe 1 ist ein deutlicher Anstieg bei allen SLT zu beobachten. Dieser Anstieg liegt beim Wissen zwischen 1,83 und 2,24; bei der Anwendungszuversicht zwischen 1,69 und 1,86 und beim Interesse zwischen 1,28 und 1,49 (vgl. **Tabelle 10**).

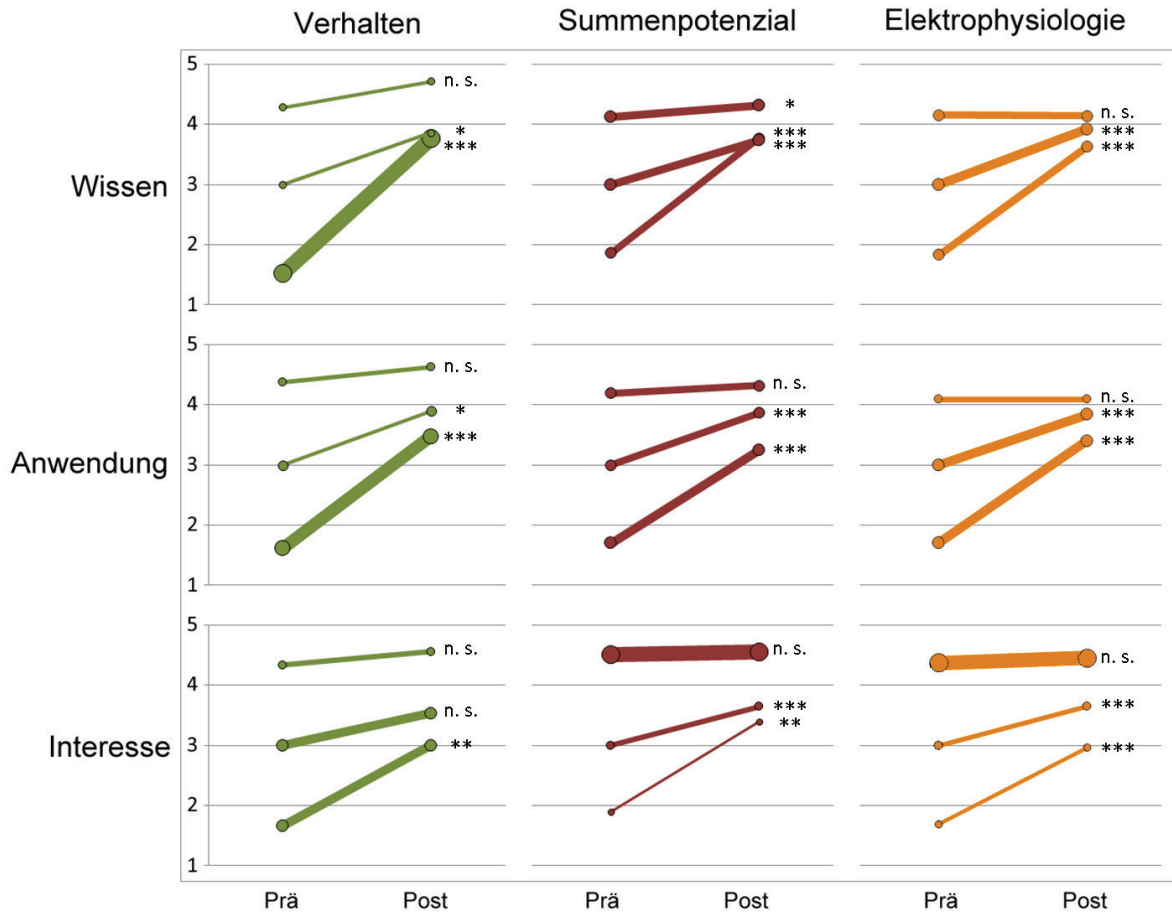


Abbildung 26: Betrachtung des Lernzuwachses der retrospektiven Prä-Post-Erhebung in Abhängigkeit von den Prä-Werten in Bezug auf Wissen über die Thematik, Anwendungszuversicht der Inhalte und Interesse am Thema.

Die Gruppierung der Prä-Werte bildet sich aus den Likert-Werten (Gruppe 1: 1 und 2; Gruppe 2: 3; Gruppe 3: 4 und 5). Die Liniendicke steht in prozentualer Relation zur Gruppengröße (Details in Tabelle 16). $n = 381$ ($n_{\text{Verhalten}} = 40$; $n_{\text{Summenpotenzial}} = 151$; $n_{\text{Elektrophysiologie}} = 190$). 5-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$ (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test).

Für die Gruppe 2 liegen die Anstiege insgesamt zwischen 0,53 und 0,92 und für die Gruppe 3 zwischen -0,02 und 0,43. Nach dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test finden sich entsprechend (hoch-)signifikante Anstiege für die Gruppen 1 und 2. Eine Ausnahme bildet der signifikante Anstieg des Wissens der Gruppe 3 am SLT „Summenpotenzial“. Für die SLT „Summenpotenzial“ und „Elektrophysiologie“ verteilen sich die Schüler bezüglich des Prä-Wissens und der Prä-Anwendungszuversicht gleichmäßiger auf die Gruppen. Das Prä-Interesse schätzten die meisten Schüler an diesen beiden Labortagen sehr hoch ein (Gruppe 3).

Tabelle 16: Einzelwerte des Lernzuwachses der retrospektiven Prä-Post-Erhebung in Abhängigkeit von den Prä-Werten in Bezug auf Wissen über die Thematik, Anwendungszuversicht der Inhalte und Interesse am Thema für die SLT (Werte zu Abb. 26).

$n = 381$ ($n_{\text{Verhalten}} = 40$; $n_{\text{Summenpotenzial}} = 151$; $n_{\text{Elektrophysiologie}} = 190$). 5-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$ (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test).

SLT		Verhalten					Summenpotenzial					Elektrophysiologie				
Variable	Gruppe	n	prä	post	Δ	p	n	prä	post	Δ	p	n	prä	post	Δ	p
Wissen	3	7	4,29	4,71	0,43	<i>n. s.</i>	50	4,12	4,32	0,20	* $p = 0,041$ $r = 0,29$	58	4,16	4,14	-0,02	<i>n. s.</i>
	2	7	3,00	3,86	0,86	* $p = 0,034$ $r = 0,80$	54	3,00	3,73	0,73	*** $p < 0,001$ $r = 0,70$	72	3,00	3,92	0,92	*** $p < 0,001$ $r = 0,81$
	1	25	1,52	3,76	2,24	*** $p < 0,001$ $r = 0,89$	44	1,86	3,77	1,91	*** $p < 0,001$ $r = 0,87$	60	1,83	3,63	1,80	*** $p < 0,001$ $r = 0,87$
Gesamt		39	2,28	3,95	1,67	*** $p < 0,001$ $r = 0,81$	148	3,04	3,94	0,9	*** $p < 0,001$ $r = 0,66$	190	2,98	3,89	0,91	*** $p < 0,001$ $r = 0,64$
Anwendung	3	8	4,38	4,63	0,25	<i>n. s.</i>	47	4,19	4,31	0,13	<i>n. s.</i>	43	4,09	4,09	0,00	<i>n. s.</i>
	2	10	3,00	3,90	0,90	* $p = 0,024$ $r = 0,71$	44	3,00	3,86	0,86	*** $p < 0,001$ $r = 0,77$	75	3,00	3,84	0,84	*** $p < 0,001$ $r = 0,76$
	1	21	1,62	3,48	1,86	*** $p < 0,001$ $r = 0,82$	57	1,70	3,25	1,54	*** $p < 0,001$ $r = 0,81$	72	1,71	3,40	1,69	*** $p < 0,001$ $r = 0,82$
Gesamt		39	2,54	3,82	1,28	*** $p < 0,001$ $r = 0,71$	148	2,88	3,77	0,89	*** $p < 0,001$ $r = 0,64$	190	2,76	3,73	0,97	*** $p < 0,001$ $r = 0,66$
Interesse	3	9	4,33	4,56	0,22	<i>n. s.</i>	95	4,52	4,55	0,04	<i>n. s.</i>	119	4,37	4,45	0,08	<i>n. s.</i>
	2	15	3,00	3,53	0,53	<i>n. s.</i>	34	3,00	3,65	0,65	*** $p < 0,001$ $r = 0,64$	42	3,00	3,64	0,64	*** $p < 0,001$ $r = 0,63$
	1	15	1,67	3,00	1,33	** $p = 0,007$ $r = 0,69$	19	1,89	3,39	1,49	** $p = 0,001$ $r = 0,76$	29	1,69	2,97	1,28	*** $p < 0,001$ $r = 0,66$
Gesamt		39	2,79	3,56	0,77	*** $p < 0,001$ $r = 0,57$	148	3,83	4,20	0,37	*** $p < 0,001$ $r = 0,41$	190	3,66	4,05	0,39	*** $p < 0,001$ $r = 0,41$

8.3 Ergebnisse des offenen Feedbacks: Neuro?Logisch! - Elektrophysiologie

Neben den geschlossenen Likert-skalierten Fragen des Feedback-Bogens für die Schüler wurden vier offene Fragen gestellt. Für den SLT „Elektrophysiologie“ haben 190 Schüler diesen Fragebogen ausgefüllt. 134 Schüler davon gaben eine Rückmeldung zu der offenen Feedback-Frage *„Welchen Versuch schätzt du als besonders lehrreich ein (Mehrfachnennungen möglich)?“*. Davon nannten 55 % den Demonstrationsversuch des EEG, 42 % die Versuche mit der Simulationsumsetzung und 25 % benannten die Mikroskopie-Station und/oder ihre einführende Lern-PowerPoint Präsentation (**Abbildung 27**). Zu der offenen Feedback-Frage *„Bei welchem Versuch hattest du Probleme (Mehrfachnennungen möglich)?“* gaben 92 Schüler eine Rückmeldung. Davon nannten 66 % die Mikroskopie-Station und/oder ihre einführende Lern-PowerPoint Präsentation, 30 % benannten die Simulationsumsetzung und 4 % den Demonstrationsversuch des EEG (**Abbildung 27**).

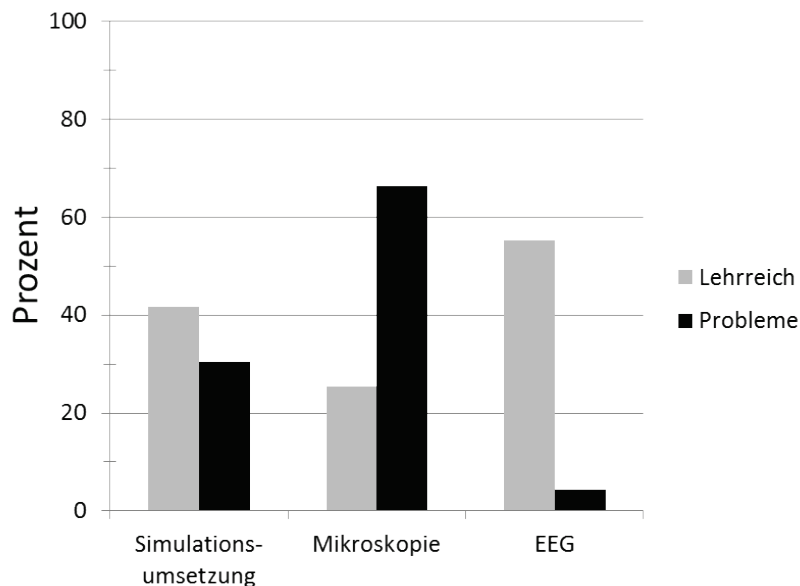


Abbildung 27: Häufigkeit der Angabe (in Prozent) der drei Versuche des SLT „Elektrophysiologie“ zur Einschätzung, welche Versuche lehrreich waren und welche Probleme bereiteten.

$n_{\text{Lehrreich}} = 134$; $n_{\text{Probleme}} = 92$.

178 Schüler gaben eine Rückmeldung zu der offenen Feedback-Frage *„Bitte nenne drei Stärken der Veranstaltung!“*. Häufig genannt wurden hierbei die Anschaulichkeit (58 %), die Wissensvermittlung (29 %) sowie die Betreuung (19 %) (vgl. **Abbildung 21**, Kapitel 8.1). Zu weiteren häufigen Nennungen gehörten die PC-Nutzung und Ausstattung (31 %), der Praxisanteil (28 %) und die Experimente im Allgemeinen (22 %). 140 Schüler gaben Verbesserungsvorschläge bei der offenen Frage *„Bitte nenne drei Punkte, durch die diese Veranstaltung verbessert werden könnte!“* an. Relevante Rückmeldungen waren diesbezüglich der Wunsch nach mehr Praxis (28 %) und die Äußerungen zu Schwierigkeiten mit dem Thema bzw. dass der Anspruch zu hoch war (28 %).

9 Befragung zu den Simulationsumsetzungen

An insgesamt 15 Terminen des SLT „Elektrophysiologie“ (5 x reine Setup-Gruppe, 10 x Versuchs- und Kontrollgruppe) wurden für die Analyse der Simulationsumsetzungen drei Testinstrumente eingesetzt: Simulationsbewertung nach Chen et al. (2016), LMS nach Dohn et al. (2016) und TAM nach Davis (1989).

9.1 Simulationsbewertung

Für die Bewertung der Simulationsumsetzung wurden die Schüler zunächst befragt, ob sie bereits Simulationssoftware benutzt haben, welche Note sie der Simulationsumsetzung geben würden und ob sie lieber die andere Simulationsumsetzung (abhängig von ihrer Untersuchungsgruppe) verwendet hätten (**Tabelle 17**). Von den 235 befragten Schülern gaben 79 % an, dass sie keine Erfahrungen mit Simulationssoftware haben. Bei der PC-Gruppe hätten 35 % lieber die Umsetzung mit Setup verwendet, jedoch gaben nur 2 % der Setup-Gruppe an, dass sie lieber die reine PC-Umsetzung benutzt hätten. Die Benotung für die Setup-Umsetzung fällt signifikant besser aus als die Benotung für die PC-Umsetzung (* $p = 0,033$; $r = 0,15$; *Mann-Whitney-U-Test*).

Tabelle 17: Einschätzung und Benotung der beiden Simulationsumsetzungen.

	n	Lieber die andere Umsetzung verwendet	Prozent	Note (MW \pm SD)
PC-Gruppe	75	26	35	2,3 \pm 0,76
Setup-Gruppe	160	3	2	2,1 \pm 0,73

Die Rückmeldungen zu den Simulationsumsetzungen auf der Basis der zehn Einzelitems nach Chen et al. (2016) sind in **Abbildung 28** dargestellt. Alle Items wurden von über 60 % der Schüler positiv bewertet (trifft zu bis trifft voll zu). Nur bei zwei Items liegen die Mittelwerte unter 3 (4-stufige LS, 1 = stimme überhaupt nicht zu, 4 = stimme voll zu): A: *Die Nutzung der Simulation ist besser, um Inhalte zu erarbeiten (im Vergleich zur Arbeit mit Arbeitszettel)*, MW = 2,86 \pm 0,88; B: *Die Option, virtuelle Setups mit weiteren Versuchen zu haben*, MW = 2,97 \pm 0,78. Die Schüler empfanden die Durchführung der Simulationsumsetzung als einfach (97 %) und haben sehr gut verstanden, was sie darstellen soll (97 %). Sie betrachteten die Simulationsumsetzung nicht als Zeitverschwendung (92 %). 85 % der Schüler gaben an, dass die Umsetzung ihnen beim Verständnis der Elektrophysiologie geholfen hat, und 84 % würden den SLT weiterempfehlen.

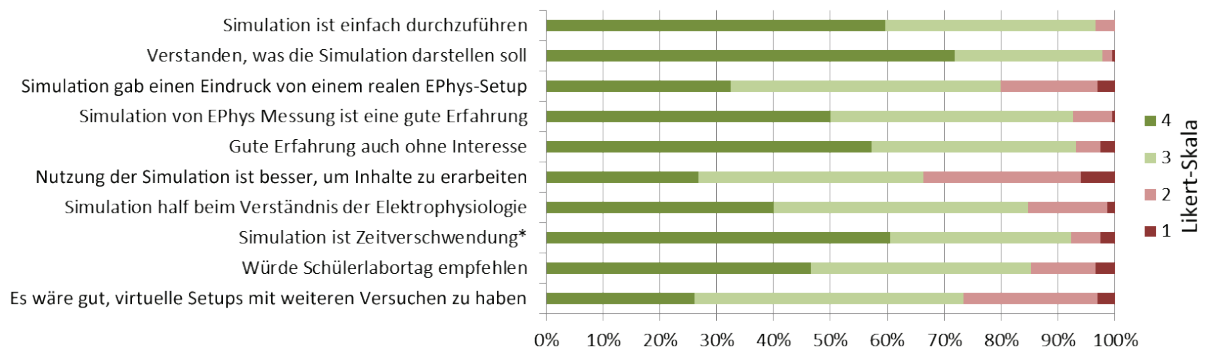


Abbildung 28: Rückmeldungen der Schüler zur Benutzung der Simulationsumsetzung (Setup-Gruppe und PC-Gruppe).

$n = 235$ ($n_{Setup} = 160$; $n_{PC} = 75$); 4-stufige LS, 1 = stimme überhaupt nicht zu, 4 = stimme voll zu. *Die Werte des Items wurden invertiert.

Die Bewertungen der beiden Items „die Simulation gab mir einen Eindruck von einem realen Elektrophysiologie Setup“ und „die Simulation der elektrophysiologischen Messungen ist eine gute Erfahrung“ unterscheiden sich für die beiden Untersuchungsgruppen (Setup-Gruppe und PC-Gruppe) signifikant und sind daher in **Tabelle 18** getrennt dargestellt. In beiden Items zeigt sich eine signifikant höhere Bewertung durch die Setup-Gruppe. Einerseits stellte die Setup-Umsetzung eine bessere Erfahrung dar und andererseits war der Eindruck von einem echten Setup ausgeprägter.

Tabelle 18: Einzelbetrachtung von Items (aus Abb. 28), die sich in ihrer Bewertung durch die beiden Untersuchungsgruppen unterscheiden.

$n = 235$ ($n_{Setup} = 160$; $n_{PC} = 75$); 4-stufige LS (1 = trifft gar nicht zu, 4 = trifft voll zu).

Item	Setup-Gruppe (MW ± SD)	PC-Gruppe (MW ± SD)	Signifikanzniveau (Mann-Whitney-U-Test)
Simulation gab einen Eindruck von einem realen EPhys-Setup	3,22 ± 0,74	2,83 ± 0,79	*** $p < 0,001$ $r = 0,24$
Simulation von EPhys-Messung ist eine gute Erfahrung	3,51 ± 0,58	3,24 ± 0,72	* $p = 0,020$ $r = 0,15$

In der Bewertung der Einzelitems (**Abbildung 28**) führte eine getrennte Auswertung nach der Kursform zu keinem signifikanten Unterschied ($n_{LK} = 200$; $n_{GK} = 35$). Bezüglich der Geschlechterunterschiede ($n_W = 149$; $n_M = 86$) bewerteten die männlichen Schüler (MW = 3,08 ± 0,85) das Item „Nutzung der Simulation ist besser, um Inhalte zu erarbeiten“ signifikant höher als die weiblichen Schüler (MW = 2,74 ± 0,87; ** $p = 0,004$; $r = 0,19$; Mann-Whitney-U-Test).

9.1.1 Komponentenanalyse der Simulationsbewertung

Für weitere Auswertungen der Einzelitems nach Chen et al. (2016) wurde eine PCA mit Varimax-Rotation durchgeführt, um Themenfelder der Bewertung zu bilden (**Tabelle 19**). Neun von zehn Items konnten für die Analyse genutzt werden (nicht verwendet: „Es wäre gut, virtuelle Setups mit weiteren Versuchen zu haben“). Die Analyse erreichte ein KMO-Maß von 0,824 und bildete zwei Komponenten ab. Die Items laden auf ihre jeweilige Komponente alle mit über 0,48 und die internen Konsistenzen der Komponenten liegen über einem Cronbach α -Maß von 0,59 und damit im akzeptablen Bereich. Die Komponente „Enjoyment & Approval“ (EA; 5 Items; $\alpha = 0,790$) wird gebildet aus den Fragen zur Erfahrung mit der Simulationsumsetzung, Empfehlung des SLT und zur Einschätzung nach der Realitätsnähe. Die Komponente „Understanding“ (US; 4 Items; $\alpha = 0,594$) bildet sich aus den Fragen zum Verständnis der Inhalte und der Durchführung.

Tabelle 19: Hauptkomponentenanalyse (Korrelationsmatrix) ausgewählter Items der Simulationsbewertung.

KMO Kriterium: 0,824; $n = 235$. *Die Werte des Items wurden invertiert.

Komponente	Item	Faktorladung	MW	SD
Enjoyment & Approval (EA) $\alpha: ,790$	Ich würde den Schülerlabortag anderen SchülerInnen empfehlen.	,846	3,27	0,80
	Auch wenn ich zukünftig keine Neurobiologie studieren möchte, war die Simulation eine gute Erfahrung.	,749	3,48	0,70
	*Die Simulation war eine Zeitverschwendung.	-,748	3,50	0,71
	Die Simulation der elektrophysiologischen Messungen ist eine gute Erfahrung.	,698	3,42	0,64
	Die Simulation gab mir einen Eindruck von einem realen Elektrophysiologie Setup.	,490	3,09	0,78
Understanding (US) $\alpha: ,594$	Ich habe verstanden, was die Simulation darstellen soll.	,747	3,69	0,52
	Die Simulation war einfach auszuführen.	,713	3,56	0,56
	Die Simulation half mir beim Verständnis der Elektrophysiologie.	,635	3,23	0,73
	Die Nutzung einer Simulation im Vergleich zur Arbeit mit Arbeitszetteln ist meiner Meinung nach die bessere Methode, um Inhalte zu erarbeiten.	,485	2,86	0,88

Dargestellt sind die Faktorladungen zur jeweiligen Komponente, Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) des jeweiligen Items sowie Cronbachs α der Komponenten. 4-stufige LS, 1 = stimme überhaupt nicht zu, 4 = stimme voll zu. Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung; Paarweiser Fallausschluss.

Ausgehend von den zwei Komponenten wird die Schülerbewertung der Simulationsumsetzung ausgewertet und abhängig von der Untersuchungsgruppe (**Abbildung 29**), dem Biologieinteresse (**Abbildung 30**) und den „Computerfähigkeiten“ (**Abbildung 31**) betrachtet.

Beide Komponenten wurden relativ hoch bewertet, die Mediane und Mittelwerte liegen durchgängig bei einem Wert über 3 (4-stufige LS, 1 = stimme überhaupt nicht zu, 4 = stimme voll zu). Die Bewertung für die Komponente „Understanding“ fällt für beide Simulationsumsetzungen gleich aus (**Abbildung 29**). Die Verteilung der Box-Plots zeigt, dass 75 % der Schüler diese Komponente positiv bewerteten (Mdn = 3,5). Die Komponente „Enjoyment & Approval“ wurde von der Setup-Gruppe (Mdn = 3,60; IQR = 0,75) signifikant höher bewertet als von der PC-Gruppe (Mdn = 3,40; IQR = 1,00; $**p = 0,008$; $r = 0,17$).

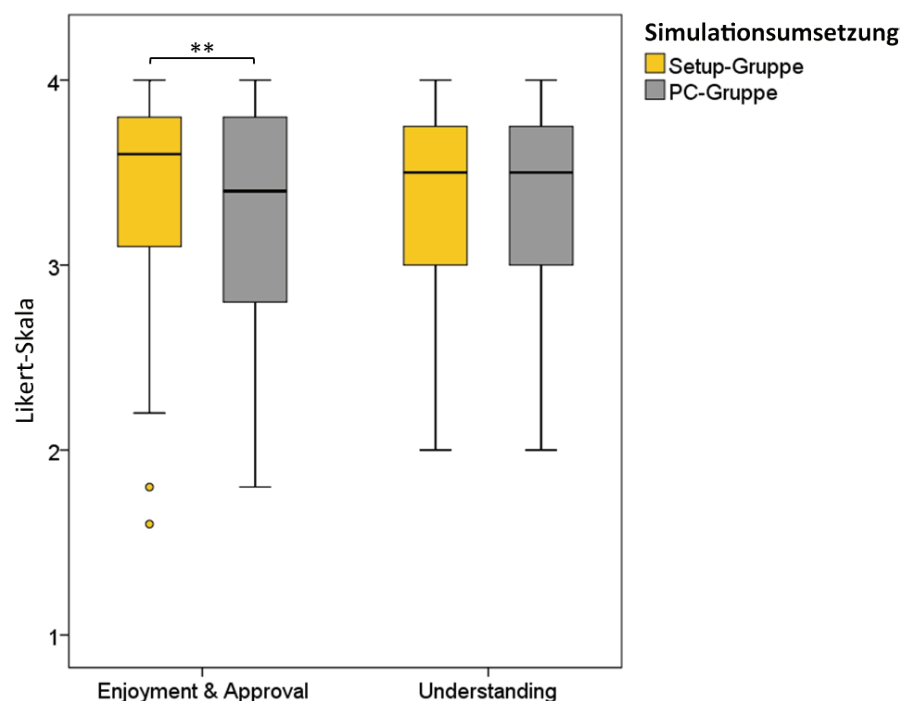


Abbildung 29: Komponentenbetrachtung der Simulationsbewertung in Abhängigkeit von der Simulationsumsetzung.

$n = 235$ ($n_{Setup} = 160$; $n_{PC} = 75$). 4-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 4 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: $*p < 0,05$; $**p < 0,01$; $***p < 0,001$ (Mann-Whitney-U-Test).

Ebenfalls findet sich ein Unterschied in der Bewertung von EA abhängig vom Biologieinteresse (**Abbildung 30**). Die sehr interessierten Schüler (Mdn = 3,60; IQR = 0,40) zeigen eine signifikant höhere Bewertung der Komponente als die interessierten Schüler (Mdn = 3,20; IQR = 0,80; $***p < 0,001$; $r = 0,32$), bei denen der untere Whisker sehr weit in den negativen Bewertungsbereich reicht

(Minimum = 1,6). Entsprechend zeigt sich ein signifikant fallender Trend der Bewertung von EA bei den nicht interessierten Schülern ($***p < 0,001$; $r = 0,31$; *Jonckheere-Terpstra-Test*). Eine Abhängigkeit der Komponente „Enjoyment & Approval“ von den „Computerfähigkeiten“ findet sich nicht (**Abbildung 31**). Ein Einfluss auf die Komponente „Understanding“ zeigt sich sowohl abhängig vom Biologieinteresse als auch von den „Computerfähigkeiten“. Die sehr interessierten Schüler (Mdn = 3,50; IQR = 0,50) bewerteten die Komponente höher als die interessierten (Mdn = 3,25; IQR = 0,59; $**p = 0,006$; $r = 0,21$); es liegt ein signifikanter Trend in der Bewertung vor ($**p = 0,004$; $r = 0,19$; *Jonckheere-Terpstra-Test*) (**Abbildung 30**). Ebenfalls bewerteten die Schüler mit guten „Computerfähigkeiten“ (Mdn = 3,50; IQR = 0,50) die Komponente US höher im Vergleich zu denen mit mittleren Fähigkeiten (Mdn = 3,25; IQR = 0,69; $*p = 0,024$; $r = 0,18$) und es findet sich ein signifikanter Trend über die Gruppen hinweg ($**p = 0,004$; $r = 0,19$; *Jonckheere-Terpstra-Test*) (**Abbildung 31**).

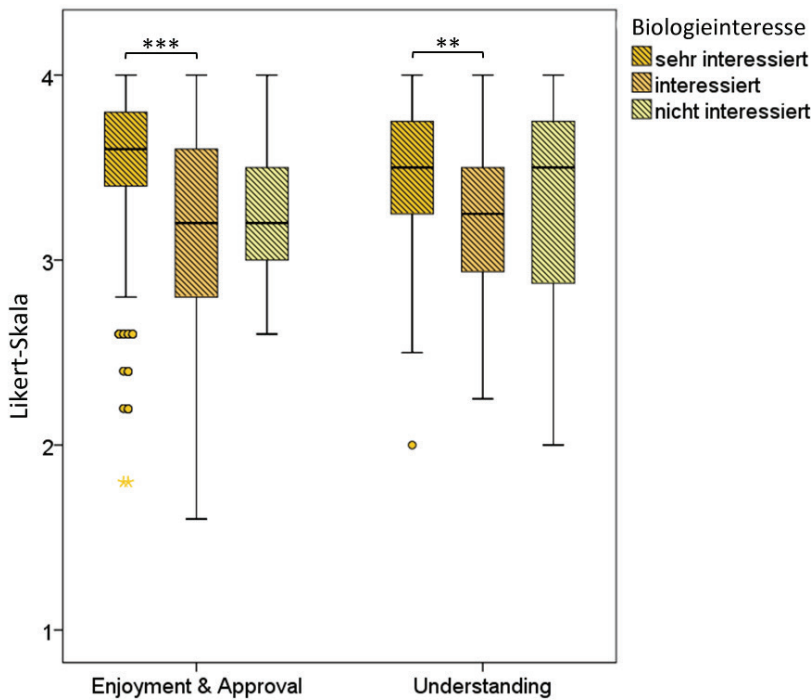


Abbildung 30: Komponentenbetrachtung der Simulationsbewertung in Abhängigkeit vom Biologieinteresse.

Gruppenverteilung anhand der Likert-Werte des Biologieinteresses (sehr interessiert: 4; interessiert: 2 und 3; nicht interessiert: 1). $n = 235$ ($n_{\text{sehr interessiert}} = 128$; $n_{\text{interessiert}} = 100$; $n_{\text{nicht interessiert}} = 7$). 4-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 4 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: $*p < 0,05$; $**p < 0,01$; $***p < 0,001$ (Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc Vergleich und Bonferroni-Korrektur).

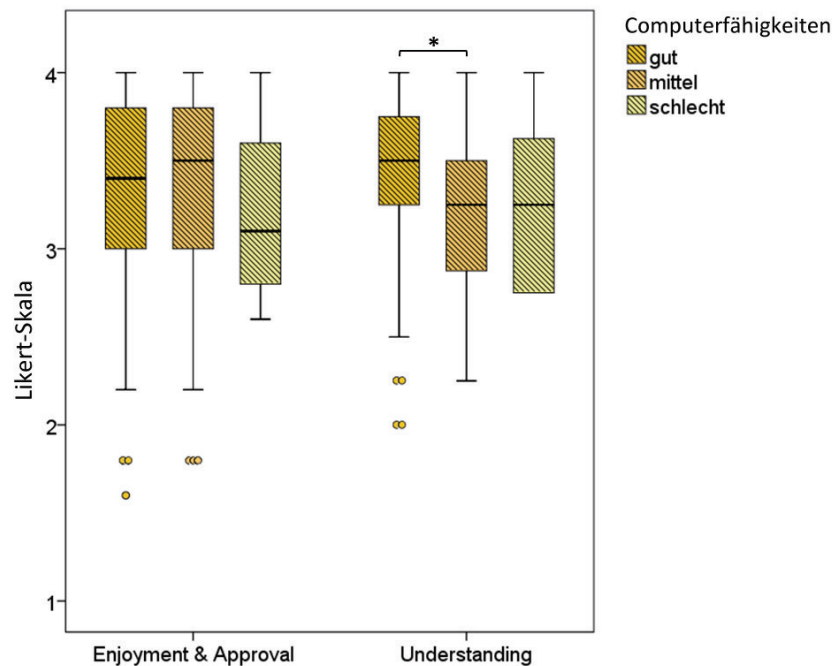


Abbildung 31: Komponentenbetrachtung der Simulationsbewertung in Abhängigkeit von den „Computerfähigkeiten“.

Gruppenverteilung anhand der Mittelwerte der Komponente „Computerfähigkeiten“ (gut: 3,00–4,00; mittel: 2,10–2,99; schlecht: 1,00–2,09). $n = 235$ ($n_{\text{gut}} = 159$; $n_{\text{mittel}} = 60$; $n_{\text{schlecht}} = 16$). 4-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 4 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$ (Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc Vergleich und Bonferroni-Korrektur).

9.2 Bewertung der Lab Motivation Scale

Für die Verifizierung der LMS nach Dohn et al. (2016) wurde eine PCA mit Varimax-Rotation durchgeführt, um die interne Konsistenz der Skala zu überprüfen (**Tabelle 20**). Vier der ursprünglichen acht „Effort“ Items wurden für die Auswertung aus der Analyse entfernt. Das Item „*Ich habe mir nicht sehr viel Mühe gegeben, gut im Arbeiten mit dem Setup zu sein*“ zeigte mit keinem anderen Item eine Korrelation von mindestens 0,3 und eignete sich daher nicht zur weiteren Analyse. Die anderen drei „Effort“ Items („*Ich war sehr beschäftigt mit der Arbeit am Setup*“; „*Ich habe mir sehr viel Mühe beim Arbeiten mit dem Setup gegeben*“; „*Es war mir wichtig, gut im Arbeiten mit dem Setup zu sein*“) haben stärker auf die Komponente „Interest“ geladen und wurden daher aus der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die Items der Komponenten „Interest“ und „Self-efficacy“ laden sehr gut. Die finale Analyse erreichte ein KMO-Maß von 0,885 und liegt damit im sehr guten Bereich. Die Items laden auf ihre jeweilige Komponente mit über 0,5 und die internen Konsistenzen der Komponenten liegen über einem Cronbach α -Maß von 0,7 und damit im guten bis sehr guten Bereich. Die Komponente „Effort“ (4 Items; $\alpha = 0,799$) wird gebildet aus Fragen, wie der Schüler bei der Arbeit mit der

Simulationsumsetzung zurechtkommt und wie sehr er sich bemühen muss. Die Komponente „Interest“ (5 Items; $\alpha = 0,880$) erhebt Fragen zur Freude beim Arbeiten mit der Simulationsumsetzung. Die Komponente „Self-efficacy“ (5 Items; $\alpha = 0,816$) erhebt die Einschätzung der Schüler zu ihrer Kompetenz im Umgang mit der Simulationsumsetzung und ihren Inhalten.

Tabelle 20: Hauptkomponentenanalyse (Korrelationsmatrix) der Lab Motivation Scale Items.
*KMO Kriterium: 0,885; n = 235. *Die Werte der Items wurden invertiert.*

Komponente	Item	Faktorladung	MW	SD
Effort (EFF) $\alpha: ,799$	Ich bin mit meiner Leistung im Arbeiten mit dem Setup zufrieden.	,852	3,30	0,69
	Ich denke, ich war ziemlich gut im Arbeiten mit dem Setup.	,839	3,15	0,67
	Ich denke, ich habe mich im Arbeiten mit dem Setup gut geschlagen.	,729	3,30	0,65
	<i>*Die Arbeit mit dem Setup war eine Tätigkeit, die ich nicht so gut erfüllen konnte.</i>	-,660	3,44	0,78
Interest (INT) $\alpha: ,880$	Das Arbeiten mit dem Setup hat Spaß gemacht.	,842	3,05	0,74
	Das Arbeiten mit dem Setup war spannend.	,815	2,99	0,72
	Das Arbeiten mit dem Setup hat mir sehr viel Freude bereitet.	,795	2,89	0,71
	Das Arbeiten mit dem Setup war interessant.	,779	3,26	0,70
	<i>*Ich fand die Arbeit mit dem Setup langweilig.</i>	-,744	3,27	0,79
Self-efficacy (SE_LE) $\alpha: ,816$	Ich bin zuversichtlich, dass ich andere Schülerinnen und Schüler jetzt in der Thematik unterstützen könnte.	,802	2,92	0,88
	Ich bin zuversichtlich, dass ich die Methoden der elektrophysiologischen Messung jetzt erläutern könnte.	,793	2,87	0,82
	Ich bin zuversichtlich, dass ich die Abiturprüfung im Bereich der Neurobiologie bestehen werde.	,768	2,98	0,90
	Ich bin sicher, dass ich von dem Schülerlabortag etwas gelernt habe.	,599	3,33	0,77
	Nach dem Besuch im Labor fühle ich mich ziemlich kompetent.	,546	2,75	0,79

Dargestellt sind die Faktorladungen zur jeweiligen Komponente, Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) des jeweiligen Items sowie Cronbachs α der Komponenten. 4-stufige LS, 1 = stimme überhaupt nicht zu, 4 = stimme voll zu. Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung; Paarweiser Fallausschluss.

Ausgehend von den drei LMS Komponenten wird die Rückmeldung der Schüler ausgewertet und abhängig von der Untersuchungsgruppe (**Abbildung 32**), dem Biologieinteresse (**Abbildung 33**) und den „Computerfähigkeiten“ (**Abbildung 34**) betrachtet.

SE_LE weist die niedrigste Bewertung auf und zeigt für alle Gruppen den niedrigsten Mittelwert im Vergleich zu den beiden anderen Komponenten. EFF weist dagegen überwiegend den höchsten Mittelwert auf, eine Ausnahme bilden die nicht interessierten Schüler, deren höchster Mittelwert (MW = 3,2; 4-stufige LS, 1 = stimme überhaupt nicht zu, 4 = stimme voll zu) in der Komponente „Interesse“ liegt (**Abbildung 33**). Alle Mediane von EFF und INT liegen ≥ 3 und damit im neutralen bis positiven Bewertungsbereich. Abhängig von der Simulationsumsetzung zeigt sich nur für INT ein signifikanter Unterschied, wobei die Setup-Gruppe die Komponente höher bewertete (Mdn = 3,20; IQR = 0,80) als die PC-Gruppe (Mdn = 3,00; IQR = 0,85; $*p = 0,018$; $r = 0,16$) (**Abbildung 32**).

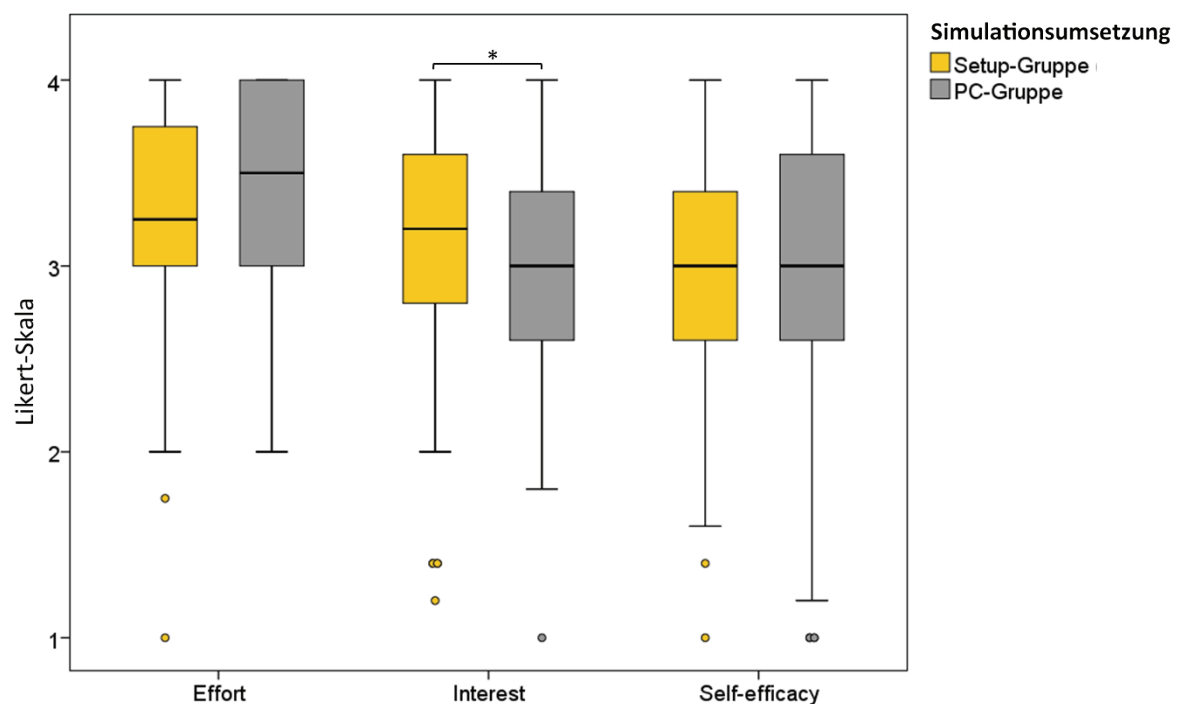


Abbildung 32: Bewertung der LMS Komponenten in Abhängigkeit von der Simulationsumsetzung.

$n = 235$ ($n_{Setup} = 160$, $n_{PC} = 75$). 4-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 4 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: $*p < 0,05$; $**p < 0,01$; $***p < 0,001$ (Mann-Whitney-U-Test).

Auch in Abhängigkeit vom Biologieinteresse zeigt sich ein signifikanter Unterschied für die Bewertung von INT, wobei diese bei den sehr interessierten Schülern (Mdn = 3,20; IQR = 0,65) höher ausfällt als bei den interessierten (Mdn = 3,00; IQR = 0,80; $***p < 0,001$; $r = 0,27$). Insgesamt zeigt sich für diese

Komponente ein steigender Trend mit zunehmendem Biologieinteresse ($***p < 0,001$; $r = 0,24$; *Jonckheere-Terpstra-Test*) (**Abbildung 33**). Auch die beiden anderen Komponenten zeigen eine Abhängigkeit vom Biologieinteresse. EFF wurde von den sehr interessierten Schülern (Mdn = 3,50; IQR = 1,00) signifikant höher bewertet als von den interessierten Schülern (Mdn = 3,25; IQR = 0,50; $***p < 0,001$; $r = 0,29$). Auch hier zeigt sich ein steigender linearer Trend mit zunehmendem Interesse ($***p < 0,001$; $r = 0,29$; *Jonckheere-Terpstra-Test*). In der Bewertung von SE_LE zeigen die sehr interessierten Schüler (Mdn = 3,28 IQR = 0,60) einen signifikanten Unterschied im Vergleich zu den interessierten Schülern (Mdn = 2,80; IQR = 0,80; $***p < 0,001$; $r = 0,46$) und zu den nicht interessierten Schülern (Mdn = 2,40; IQR = 1,20; $*p = 0,011$; $r = 0,25$). Der Trend der Mediane steigt signifikant mit zunehmendem Biologieinteresse ($***p < 0,001$; $r = 0,47$; *Jonckheere-Terpstra-Test*).

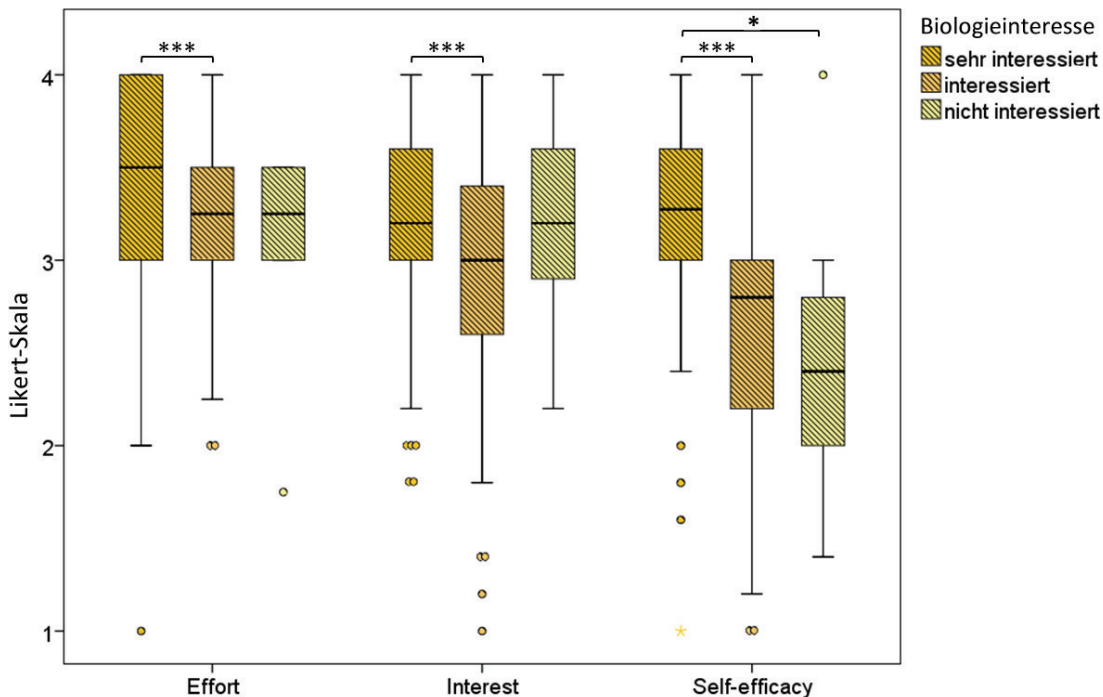


Abbildung 33: Bewertung der LMS Komponenten in Abhängigkeit vom Biologieinteresse. Gruppenverteilung anhand der Likert-Werte des Biologieinteresses (sehr interessiert: 4; interessiert: 2 und 3; nicht interessiert: 1). $n = 235$ ($n_{\text{sehr interessiert}} = 128$; $n_{\text{interessiert}} = 100$; $n_{\text{nicht interessiert}} = 7$). 4-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 4 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: $*p < 0,05$; $**p < 0,01$; $***p < 0,001$ (Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc Vergleich und Bonferroni-Korrektur).

Abhängig von den „Computerfähigkeiten“ finden sich keine Unterschiede in der Bewertung der Komponente „Interest“; allerdings zeigt der *Jonckheere-Terpstra-Test* einen signifikant steigenden Trend der Mediane mit zunehmenden „Computerfähigkeiten“ ($*p = 0,035$; $r = 0,14$). Die Schüler mit

guten Fähigkeiten zeigen zudem signifikante Unterschiede im Vergleich zu den beiden anderen Fähigkeits-Gruppen in der Bewertung von EFF und SE_LE (**Abbildung 34**). Für EFF liegt der Median für die Schüler mit guten „Computerfähigkeiten“ besonders hoch (Mdn = 3,50; IQR = 0,75), wobei die Bewertung einen signifikanten Unterschied zu den Schülern mit mittleren „Computerfähigkeiten“ (Mdn = 3,25; IQR = 0,75; $*p = 0,016$; $r = 0,19$) sowie zu denen mit schlechten „Computerfähigkeiten“ zeigt (Mdn = 3,00; IQR = 0,63; $**p = 0,009$; $r = 0,23$). Auch ein signifikanter Trend über die Gruppen hinweg kann demnach nachgewiesen werden ($***p < 0,001$; $r = 0,24$; *Jonckheere-Terpstra-Test*). Für SE_LE liegt der Median für die Schüler mit guten „Computerfähigkeiten“ mit 3,20 noch im guten Bewertungsbereich und zeigt einen signifikanten Unterschied zu den Schülern mit mittleren „Computerfähigkeiten“ (Mdn = 2,80; IQR = 0,80; $**p = 0,004$; $r = 0,22$) sowie zu denen mit schlechten „Computerfähigkeiten“ (Mdn = 2,80; IQR = 0,75; $*p = 0,034$; $r = 0,19$). Mit steigenden „Computerfähigkeiten“ steigt auch die Bewertung der Komponente „Self-efficacy“ ($***p < 0,001$; $r = 0,25$; *Jonckheere-Terpstra-Test*).

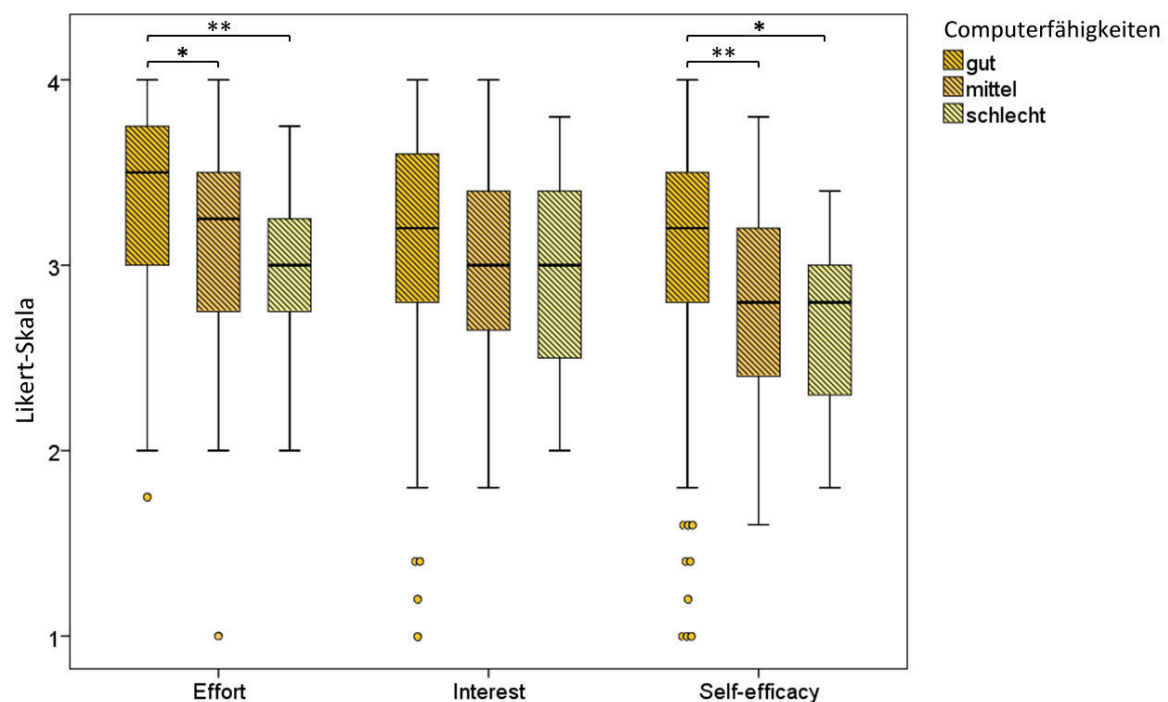


Abbildung 34: Bewertung der LMS Komponenten in Abhängigkeit von den „Computerfähigkeiten“.

Gruppenverteilung anhand der Mittelwerte der Komponente „Computerfähigkeiten“ (gut: 3,00–4,00; mittel: 2,10–2,99; schlecht: 1,00–2,09). $n = 235$ ($n_{\text{gut}} = 159$; $n_{\text{mittel}} = 60$; $n_{\text{schlecht}} = 16$). 4-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 4 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: $*p < 0,05$; $**p < 0,01$; $***p < 0,001$ (Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc Vergleich und Bonferroni-Korrektur).

9.3 Bewertung des Technology Acceptance Model

Für die Analyse der TAM Items wurde eine PCA mit Varimax-Rotation durchgeführt, um die interne Konsistenz der Skala zu überprüfen und geeignete Komponenten zu finden (**Tabelle 21**). Von den zehn eingesetzten PEOU Items konnten sechs für die weitere Analyse verwendet werden. Für die Komponente PU erfüllten drei der sechs verwendeten Items die Auswahlkriterien; die anderen drei Items nach Diwakar et al. (2014) mussten von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden. Stattdessen verteilten sich zwei der „Relative Advantage“ Items und zwei „Attitude“ Items zusätzlich auf die Komponente PU und wurden entsprechend neu zugeordnet. Diese vier neu zugeordneten Items beziehen sich thematisch auf die Lernwirksamkeit und passen daher inhaltlich gut zu der Komponente PU. Die Komponente „Attitude“ verfiel damit. Zwei weitere „Relative Advantage“ Items luden auf PE und wurden entsprechend neu zugeordnet, womit auch die Komponente „Relative Advantage“ nicht berücksichtigt wurde. Die drei eingesetzten PE Items blieben zusätzlich für die Auswertung erhalten. Die finale PCA erreichte ein KMO-Maß von 0,889 und liegt damit im sehr guten Bereich (**Tabelle 21**). Alle Items laden auf ihre jeweilige Komponente mit über 0,6 und die internen Konsistenzen der Komponenten liegen über einem Cronbach α -Maß von 0,7 und damit im guten bis sehr guten Bereich. Die Komponente PEOU (6 Items; $\alpha = 0,767$) bildet sich aus Fragen zur Benutzerfreundlichkeit der Simulationsumsetzung. Die Komponente PU (7 Items; $\alpha = 0,926$) erhebt die wahrgenommene Nützlichkeit der Simulationsumsetzung zum Lernen der Inhalte. Die Komponente PE (5 Items; $\alpha = 0,835$) beinhaltet Fragen zur Freude bei der Arbeit mit der Simulationsumsetzung.

Tabelle 21: Hauptkomponentenanalyse (Korrelationsmatrix) des Technologieakzeptanzmodells. Zusätzlich sind zu den gebildeten Komponenten die ursprüngliche Komponenten-Zugehörigkeit und die zugrunde liegenden Arbeiten angegeben.

KMO Kriterium: 0,889; n = 193. * Die Werte der Items wurden invertiert.

Komponente	Ursprüngliche Komponente	Item	Autoren	Faktorladung	MW	SD
Perceived Ease of Use (PEOU)	Perceived Ease of Use	<i>*Ich fand das virtuelle Setup umständlich zu bedienen.</i>	Davis 85/89 Park 09 Venkatesh/Bala 08	-,735	4,35	0,75
		Das Arbeiten mit dem virtuellen Setup war klar und verständlich.	Davis 85/89 Diwakar et al. 14 Venkatesh/Bala 08	,710	4,16	0,81
		Ich fand das virtuelle Setup leicht zu benutzen.	Davis 85/89 Park 09 Venkatesh/Bala 08	,683	4,34	0,74
		<i>*Die Nutzung des virtuellen Setups hat mich verwirrt.</i>	Davis 85	-,658	4,09	1,01
		<i>*Ich hatte während der Durchführung Probleme mit dem virtuellen Setup.</i>	Diwakar et al. 14	-,632	3,91	1,09
		Es fiel mir leicht zu lernen, wie man das virtuelle Setup bedient.	Davis 89 Park 09	,604	4,47	0,71
Perceived Usefulness (PU)	Perceived Usefulness	Ich würde das virtuelle Setup in der Schule nützlich finden.	Davis 89 Venkatesh/Bala 08	,797	3,55	1,10
		Das virtuelle Setup könnte es einfacher machen, Unterrichtsinhalte zu lernen.	Davis 89 Park 09	,790	3,60	1,04
		Das virtuelle Setup könnte meine Lernleistung in der Neurobiologie verbessern.	Davis 89 Park 09 Venkatesh/Bala 08	,632	3,46	1,02
	Attitude	Lernen mit dem virtuellen Setup ist eine sinnvolle Idee.	Park 09	,850	3,79	0,98
		Lernen mit dem virtuellen Setup ist eine gute Idee.	Park 09	,798	3,85	0,98
	Relative Advantage	Ich fände es vorteilhaft, das virtuelle Setup zum Lernen zu benutzen.	Diwakar et al. 14	,830	3,43	1,11
		Die Verwendung des Setups würde das Lernen für die Neurobiologie einfacher machen.	Diwakar et al. 14	,811	3,62	1,01
Perceived Enjoyment (PE)	Perceived Enjoyment	Ich fand es unterhaltsam, das virtuelle Setup zu nutzen.	Venkatesh/Bala 08	,808	3,82	0,97
		Ich hatte Spaß dabei, das virtuelle Setup zu benutzen.	Venkatesh/Bala 08	,781	3,72	1,05
		Die praktische Nutzung des virtuellen Setups war ansprechend.	Venkatesh/Bala 08	,673	3,79	0,96
	Relative Advantage	Ich fand das virtuelle Setup motivierend.	Diwakar et al. 14	,755	3,42	1,04
		Ich hatte das Gefühl, an einem realen Mess-Setup zu arbeiten.	Diwakar et al. 14	,630	3,24	1,19

Dargestellt sind die Faktorladungen zur jeweiligen Komponente, Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) des jeweiligen Items sowie Cronbachs α der Komponenten. 5-stufige LS, 1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu. Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung; Paarweiser Fallausschluss.

Ausgehend von den drei Komponenten wird die Rückmeldung der Schüler für die TAM Skala ausgewertet und abhängig von der Untersuchungsgruppe (**Abbildung 35**), dem Biologieinteresse (**Abbildung 36**) und den „Computerfähigkeiten“ (**Abbildung 37**) betrachtet.

PEOU zeigt bezüglich der unabhängigen Variablen für jede Gruppe häufig den höchsten Median und immer den höchsten Mittelwert im Vergleich zu den anderen Komponenten des TAM. PU weist stets die höchste Standardabweichung auf (0,79–1,25; 5-stufige LS, 1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu.); eine Ausnahme bildet die Bewertung der Schüler mit geringeren „Computerfähigkeiten“ für PE (SD = 0,68). Abhängig von der Simulationsumsetzung liegt nur für PE ein signifikanter Unterschied vor. Die Schüler der Setup-Gruppe (Mdn = 3,80; IQR = 1,00) bewerteten die Komponente signifikant höher als die Schüler der PC-Gruppe (Mdn = 3,40; IQR = 1,20; $**p = 0,003$; $r = 0,21$) (**Abbildung 35**). Die Box-Plots der beiden anderen Komponenten verteilen sich für die jeweiligen Gruppen relativ ähnlich.

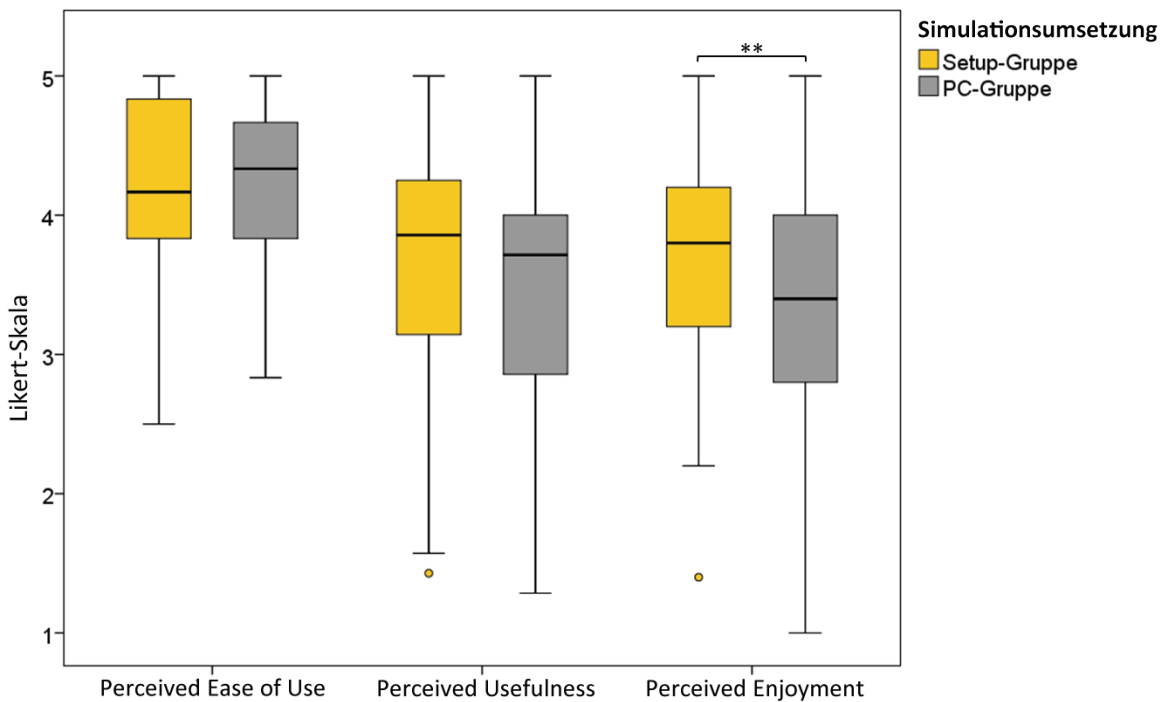


Abbildung 35: Bewertung der TAM Komponenten in Abhängigkeit von der Simulationsumsetzung.

$n = 193$ ($n_{Setup} = 124$; $n_{PC} = 69$). 5-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: $*p < 0,05$; $**p < 0,01$; $***p < 0,001$ (Mann-Whitney-U-Test).

Für PE zeigt sich außerdem eine Abhängigkeit vom Biologieinteresse (**Abbildung 36**). Die sehr interessierten Schüler (Mdn = 4,00; IQR = 1,20) bewerteten die „wahrgenommene Freude“ signifikant höher als die interessierten Schüler (Mdn = 3,40; IQR = 1,10; $**p = 0,003$; $r = 0,24$). Es liegt ein signifikanter Trend abhängig vom Biologieinteresse vor ($**p = 0,004$; $r = 0,21$; *Jonckheere-Terpstra-Test*).

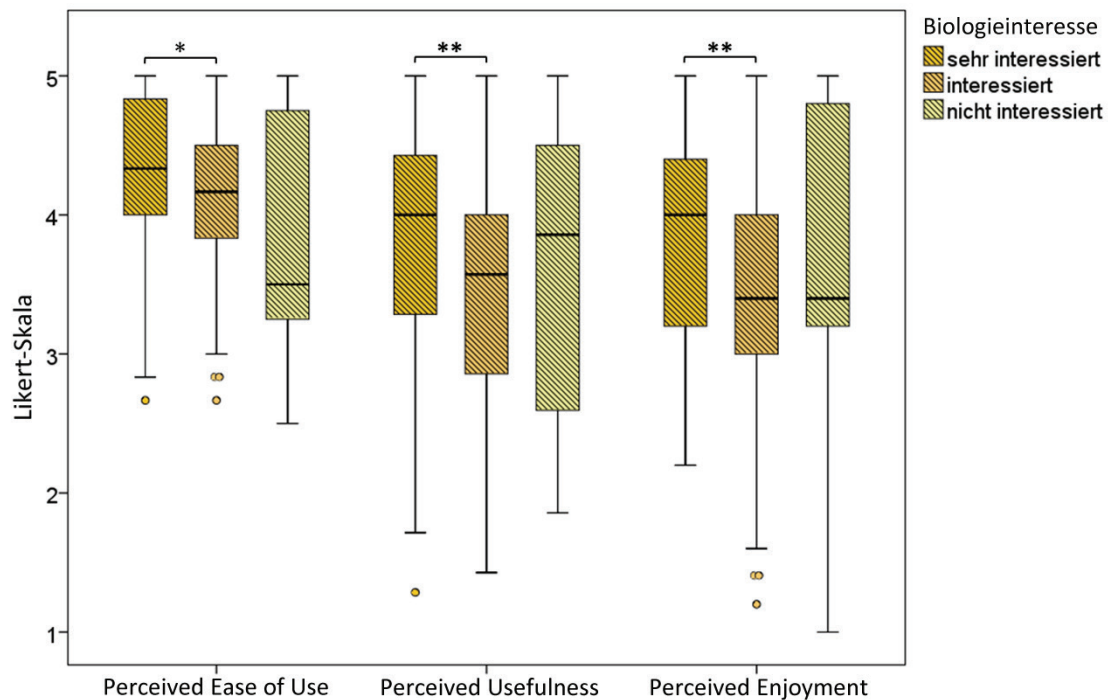


Abbildung 36: Bewertung der TAM Komponenten in Abhängigkeit vom Biologieinteresse.

Gruppenverteilung anhand der Likert-Werte des Biologieinteresses (sehr interessiert: 4; interessiert: 2 und 3; nicht interessiert: 1). $n = 193$ ($n_{\text{sehr interessiert}} = 93$; $n_{\text{interessiert}} = 93$; $n_{\text{nicht interessiert}} = 7$). 5-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: $*p < 0,05$; $**p < 0,01$; $***p < 0,001$ (Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc Vergleich und Bonferroni-Korrektur).

Die Bewertungen für PU und PEOU zeigen eine Abhängigkeit von den „Computerfähigkeiten“ und vom Biologieinteresse. Die sehr interessierten Schüler bewerteten PEOU und auch PU höher als die interessierten Schüler (PEOU: $\text{Mdn}_{\text{sehr interessiert}} = 4,33$; $\text{IQR} = 0,83$; $\text{Mdn}_{\text{interessiert}} = 4,17$; $\text{IQR} = 0,83$; $*p = 0,038$; $r = 0,18$. PU: $\text{Mdn}_{\text{sehr interessiert}} = 4,00$; $\text{IQR} = 1,14$; $\text{Mdn}_{\text{interessiert}} = 3,457$; $\text{IQR} = 1,14$; $**p = 0,003$; $r = 0,24$). Beide Komponenten zeigen einen linearen Trend, der mit dem Biologieinteresse der Schüler steigt (PEOU: $**p = 0,006$; $r = 0,20$; PU: $**p = 0,002$; $r = 0,22$; *Jonckheere-Terpstra-Test*) (**Abbildung 36**). Die Schüler bewerteten PEOU abhängig von ihren „Computerfähigkeiten“ unterschiedlich ($*p = 0,024$; *Kruskal-Wallis-Test*), jedoch kann im paarweisen Vergleich der Unterschied zwischen den Gruppen nicht genauer spezifiziert werden. Der *Jonckheere-Terpstra-Test* belegt

aber einen linearen Trend abhängig von den „Computerfähigkeiten“ (** $p = 0,007$; $r = 0,19$). Außerdem bewerteten die Schüler mit guten „Computerfähigkeiten“ (Mdn = 3,86; IQR = 1,21) PU höher als die Schüler mit mittleren Fähigkeiten (Mdn = 3,57; IQR = 1,14; * $p = 0,025$; $r = 0,20$). Ein signifikanter Trend abhängig von den „Computerfähigkeiten“ liegt für die Komponente PU ebenfalls vor (** $p < 0,001$; $r = 0,24$; *Jonckheere-Terpstra-Test*) (**Abbildung 37**).

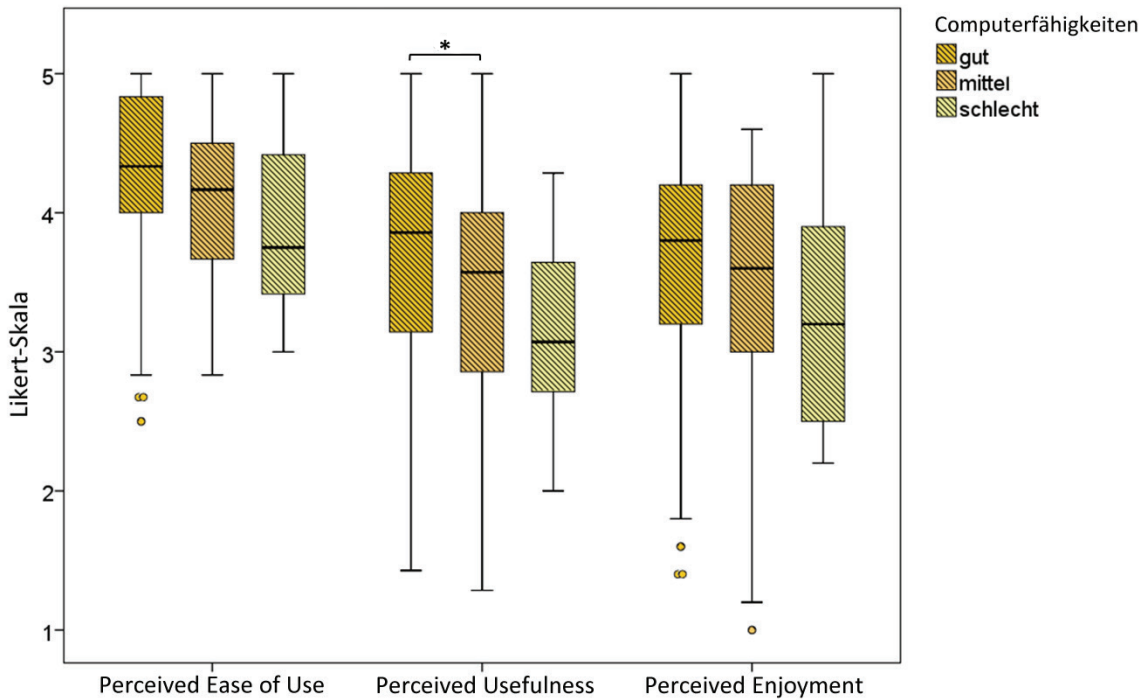


Abbildung 37: Bewertung der TAM Komponenten in Abhängigkeit von den „Computerfähigkeiten“.

Gruppenverteilung anhand der Mittelwerte der Komponente „Computerfähigkeiten“ (gut: 3,00–4,00; mittel: 2,10–2,99; schlecht: 1,00–2,09). $n = 193$ ($n_{\text{gut}} = 129$; $n_{\text{mittel}} = 52$; $n_{\text{schlecht}} = 12$). 5-stufige LS (1 = stimme überhaupt nicht zu, 5 = stimme voll zu). Signifikanzniveaus: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$ (Kruskal-Wallis-Test mit post-hoc Vergleich und Bonferroni-Korrektur).

9.4 Gruppenspezifische Einflüsse

Um auch für die Erhebungen zu den Simulationsumsetzungen weitere differenzierte Einschätzungen zu erhalten, wurde eine erneute Analyse der Abhängigkeit von weiteren Variablen für alle drei Testinstrumente (Simulationsbewertung, LMS und TAM) vorgenommen und dazu Unterschiede zwischen den Geschlechtern (Weiblich/Männlich) und den Kursformen (Leistungskurs/Grundkurs) betrachtet (**Tabelle 22**).

Tabelle 22: Abhängigkeit der Komponenten von den Variablen Geschlecht und Kursform in Bezug zum Testinstrument.

$n_{\text{Simulationsbewertung}} = 235$; $n_{\text{LMS}} = 235$; $n_{\text{TAM}} = 193$. Signifikanzniveaus: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$ (Mann-Whitney-U-Test).

Testinstrument	Komponente	Vergleichsvariable	
		Geschlecht	Kursform
Simulationsbewertung	Enjoyment & Approval	n. s.	n. s.
	Understanding	M > W * $p = 0,036$ $r = 0,14$	n. s.
LMS	Effort	n. s.	n. s.
	Interest	n. s.	n. s.
	Self-efficacy	n. s.	LK > GK * $p = 0,032$ $r = 0,14$
TAM	Perceived Ease of Use	n. s.	n. s.
	Perceived Usefulness	M > W * $p = 0,013$ $r = 0,18$	n. s.
	Perceived Enjoyment	n. s.	n. s.

M: Männlich, W: Weiblich, GK: Grundkurs, LK: Leistungskurs. Simulationsbewertung (n): W = 149; M = 86; LK = 200; GK = 35. LMS (n): W = 149; M = 86; LK = 200; GK = 35. TAM (n): W = 126; M = 67; LK = 158; GK = 35.

Dabei wurden nur wenige signifikante Unterschiede gefunden. Die männlichen Schüler bewerteten die Komponenten US und PU signifikant höher als die weiblichen Schüler. Außerdem bewerteten die Leistungskurschüler SE_LE signifikant höher als die Grundkurschüler. Es kann ausgeschlossen werden, dass die dargestellten signifikanten Unterschiede in den Bewertungen von US (bzgl. „Computerfähigkeiten“ und Biologieinteresse) und PU (bzgl. Biologieinteresse) aufgrund der Geschlechterunterschiede zustande kommen, da sich die männlichen Schüler mit maximaler Abweichung von 9-11 % auf die relevanten Gruppen verteilen. Ebenso ist davon auszugehen, dass die Kursformunterschiede keinen Einfluss auf die Bewertung von SE_LE bezüglich der „Computerfähigkeiten“ zeigen (Abweichung der Verteilung: 6 %). Die Bewertung von PU bezüglich der „Computerfähigkeiten“ ist dagegen zu diskutieren, da sich die Geschlechter ungleichmäßig auf diese Gruppen verteilen ($M_{\text{gut}} = 41\%$; $M_{\text{mittel}} = 19\%$). Ebenso gilt es, die Bewertung von SE_LE bezüglich des Biologieinteresses auf Grund der Verteilung der Leistungskurschüler näher zu betrachten ($LK_{\text{nicht interessiert}} = 29\%$; $LK_{\text{interessiert}} = 79\%$; $LK_{\text{sehr interessiert}} = 93\%$) (vgl. Anhang C).

Rückblickend wurde untersucht, ob die verwendete Simulationsumsetzung einen Einfluss auf die Bewertungen der Feedback Komponenten (vgl. Kapitel 8.1) und/oder die retrospektiven Einschätzungen (vgl. Kapitel 8.2) aufweist. Für die Feedback Komponenten zeigt sich ein signifikanter Unterschied in der Komponente „Einblick in wissenschaftliche Forschungsarbeit“ zugunsten der Setup-Gruppe ($n_{\text{Setup}} = 121$; $n_{\text{PC}} = 67$; $MW_{\text{Setup}} = 3,81 \pm 0,84$; $MW_{\text{PC}} = 3,40 \pm 0,84$; 5-stufige LS; $***p < 0,001$; $r = 0,25$; *Mann-Whitney-U-Test*). Hinsichtlich der retrospektiven Items bewerten die Setup-Schüler ($MW = 4,20 \pm 0,84$) ihr Post-Interesse höher als die PC-Schüler ($MW = 3,84 \pm 1,08$; $*p = 0,32$; $r = 0,16$; *Mann-Whitney-U-Test*).

10 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Rückmeldungen der Lehrkräfte zeigen geringe experimentelle Anteile in der Schule bezüglich der Themenfelder zur Neurobiologie auf. Dies erklärt die Rückmeldung, dass Schülerlabore zu diesen Themenfeldern für die Lehrkräfte sehr wünschenswert sind. Die im „Schülerlabor Neurowissenschaften“ umgesetzten SLT für die Sekundarstufe II wurden von den Lehrkräften positiv bewertet, wobei der Zugewinn an neuen Methoden und Inhalten für die Lehrkräfte selbst geringer eingeschätzt wurde als für die Schüler. Die Schüler bewerteten die drei SLT ebenfalls positiv, die Benotung liegt im Mittel zwischen 2,05 und 2,14. Der Einfluss des „Ausgangsinteresses“ der Schüler auf die Bewertung der SLT fällt gering aus. Auch wenn die Mittelwerte der nicht interessierten Schüler teils unter denen der sehr interessierten liegen, kann insgesamt festgehalten werden, dass auch die nicht interessierten Schüler die fünf Bewertungskomponenten im Mittel positiv bewerteten. Die retrospektive Prä-Post-Erhebung des Lernzuwachses zeigt für alle drei SLT und Variablen einen höchst signifikanten Anstieg. Besonders stark ist dieser Anstieg in den Gruppen mit geringen Ausgangswerten. Der SLT „Verhalten“ zeigt niedrigere Werte für das Prä-Wissen sowie für das Prä- und Post-Interesse am Thema.

Die verwendeten Simulationsumsetzungen, die am SLT „Elektrophysiologie“ eingesetzt werden, bewerteten 42 % der Schüler als lehrreich. Die Bewertungsrückmeldungen fallen positiv aus, wobei die Setup-Gruppe die Umsetzung etwas besser benotete als die PC-Gruppe. Ausgehend von den drei Testinstrumenten, mit denen die Simulationsumsetzung evaluiert wurde, zeigt sich abhängig von der Untersuchungsgruppe eine signifikant höhere Bewertung durch die Setup-Gruppe für die

Komponenten „Enjoyment & Approval“ (Simulationsbewertung), „Interest“ (LMS) und „Perceived Enjoyment“ (TAM). Abhängig vom Biologieinteresse finden sich signifikante Unterschiede zugunsten der sehr interessierten Schüler für alle acht Komponenten der drei Testinstrumente (Simulationsbewertung, LMS & TAM). Alle Komponenten weisen entsprechend einen signifikant steigenden Trend mit zunehmendem Biologieinteresse auf. Abhängig von den „Computerfähigkeiten“ finden sich signifikante Unterschiede zugunsten der Schüler mit guten Fähigkeiten bei den Komponenten „Understanding“ (Simulationsbewertung), „Effort“, „Self-efficacy“ (LMS), und „Perceived Usefulness“ (TAM). Die vier Komponenten weisen entsprechend einen signifikant steigenden Trend mit zunehmenden „Computerfähigkeiten“ auf. Dieser Trend konnte unabhängig von signifikanten Gruppenunterschieden auch für die Komponenten „Interest“ (LMS) und „Perceived Ease of Use“ (TAM) nachgewiesen werden.

11 Strukturgleichungsmodell des TAM

11.1 Methode und vorgeschlagenes Modell

Aufbauend auf den Ergebnissen der PCAs ist es möglich, die gebildeten Komponenten in einem Modell zusammenzuführen. Für eine genauere Betrachtung von möglichen Einflussvariablen auf die beiden Kernkomponenten PU und PEOU des TAM wird dazu abschließend ein Strukturgleichungsmodell berechnet. Das Modell spezifiziert die Beziehung, Richtung und Gewichtung zwischen latenten Variablen (Bühner 2011).

Da im Rahmen von konfirmatorischen Faktorenanalysen minderungskorrigierte Ladungen, Kovarianzen oder Korrelationen berechnet werden, empfiehlt sich für die Analyse des Strukturmodells, die latenten Variablen über eine konfirmatorische Faktorenanalyse mit zu berechnen. So wird bei der Berechnung der Pfade (Regressionsgewichte) zwischen den latenten Variablen die Reliabilität der manifesten Items berücksichtigt, sodass die latenten Variablen und Regressionsgewichte minderungskorrigiert (messfehlerfrei) vorliegen (Bühner 2011, S. 389). Aus diesem Grund wurden die latenten Variablen für das Strukturmodell mittels einer konfirmatorischen Faktorenanalyse mitberechnet, der die Ergebnisse der vorangegangenen exploratorischen Faktorenanalysen (vgl. Kapitel 9.2 und 9.3) zugrunde liegen. Mit dem gebildeten **Strukturgleichungsmodell** (Structural equation modeling, SEM) kann dann die innere Konsistenz einer auf theoretischen Annahmen basierenden Struktur von mehreren gerichteten Einflüssen und wechselseitigen Zusammenhängen analysiert werden. Diese werden als **Regressionsgewicht β** angegeben. Dabei handelt es sich um die auf den Wertebereich standardisierten Regressionskoeffizienten. Sie geben Aufschluss über die Stärke des Einflusses einer Prädiktorvariablen auf die Kriteriumsvariable. Demnach wird der β -Wert als Effektstärkemaß eingeschätzt und nach den Empfehlungen von Cohen (1988, 1992) folgendermaßen eingeordnet:

$\beta \geq 0,1$	kleiner Effekt
$\beta \geq 0,3$	mittlerer Effekt
$\beta \geq 0,5$	großer Effekt

Das **Bestimmtheitsmaß R^2** schätzt den durch alle Prädiktorvariablen vorhersagbaren Anteil der Varianz der Kriteriumsvariablen.

Die Modellanalyse wurde mit AMOS 26 (IBM, SPSS Amos, Inc., Chicago, Illinois, USA) angelegt und berechnet. Fehlende Werte wurden durch die Mittelwerte der Reihe ersetzt. Als Schätzmethode wird die **Maximum-Likelihood-Methode** eingesetzt, da ihre Parameterschätzung relativ robust gegenüber der Verletzung ihrer Voraussetzungen ist, wie z. B. eine multivariate Normalverteilung (Bühner 2011; Baltès-Götz 2015). Die Beurteilung des Modells kann über einen exakten und/oder über einen approximativen Modellfit erfolgen (Bühner 2011). Für einen exakten Modellfit sollte der mit dem χ^2 -Wert korrespondierende p -Wert keine Signifikanz aufweisen. Jedoch nimmt mit steigender Stichprobengröße die Stärke des χ^2 -Tests zu, sodass bereits geringe Modellabweichungen zur Ablehnung des Modells führen können. Aufgrund dieser Sensitivität für Modellfehlspezifikationen wird in der vorliegenden Arbeit ein approximativer Modellfit angegeben. Die Analyse in AMOS bietet vielfältige **Fit-Indizes** an. Beauducel und Wittmann (2005) empfehlen eine Betrachtung folgender Kriterien: χ^2 -Wert mit dazugehörigem p -Wert, CFI (Comparative-Fit-Index), RMSEA (Root-Mean-Square-Error of Approximation) und SRMR (Standardized-Root-Mean-Residual). Hu und Bentler (1999) schlagen zu den Fit-Indizes sogenannte Cut-off-Werte vor, an denen sich die Güte des Modells orientiert. Folgende Kriterien werden dazu in der vorliegenden Arbeit übernommen:

- $N > 250$: RMSEA $< 0,06$; $N \leq 250$: RMSEA $< 0,08$
- SRMS $< 0,08$
- CFI $\sim 0,95$ oder größer

Des Weiteren wird in der vorliegenden Arbeit auch der Fit-Index χ^2/df angegeben:

- $\chi^2/df < 3$ (nach Carmines und Mclver 1981)

Für das SEM wurden neben den erhobenen und in der Auswertung gebildeten TAM Komponenten (PU, PEOU, und PE) auch die beiden Komponenten EFF und SE_LE der LMS als mögliche Einflussvariablen auf das Modell analysiert. Die Komponente „Interest“ der LMS wird nicht berücksichtigt, da sie die situative Empfindung und Bewertung zu der praktischen Arbeit mit der Simulationsumsetzung umfasst und somit in ihren Items in großen Teilen als überschneidend mit der Komponente PE des TAM betrachtet werden muss (z. B. „Interest“ der LMS: *„Das Arbeiten mit dem Setup hat Spaß gemacht“*; PE des TAM: *„Ich hatte Spaß dabei, das virtuelle Setup zu benutzen“*). Auch die Komponenten der Simulationsbewertung bleiben unberücksichtigt, da die Komponente „Enjoyment & Approval“ der erläuterten Komponente „Interest“ ähnlich ist und die Komponente „Understanding“ überschneidend mit SE_LE zu verstehen ist. Im Modell mitberücksichtigt wird aber die gebildete

Komponente „Computerfähigkeiten“ (vgl. Kapitel 4 und 6.2.2) und in diesem Zusammenhang als „Computer Self-efficacy“ („Computerselbstwirksamkeit“, PC_SE) definiert. **Abbildung 38** zeigt das vorgeschlagene Strukturmodell und die möglichen Einflussvariablen (PE, EFF, SE_LE, PC_SE) auf die TAM Kernkomponenten PU und PEOU. Die gebildeten Hypothesen des Modells beruhen auf der bisherigen Forschung zum Technologieakzeptanzmodell, wobei im Besonderen die Literatur zum E-Learning Bereich Beachtung fand. Aufgrund der großen inhaltlichen Nähe der Prädiktorvariablen werden außerdem **Korrelationen** (ungerichtete Wechselwirkungen) zwischen den Variablen angenommen und infolgedessen im Modell berücksichtigt. Nachstehend werden die Hypothesen (H1a-H5b) der vorgeschlagenen Pfade im Einzelnen erläutert.

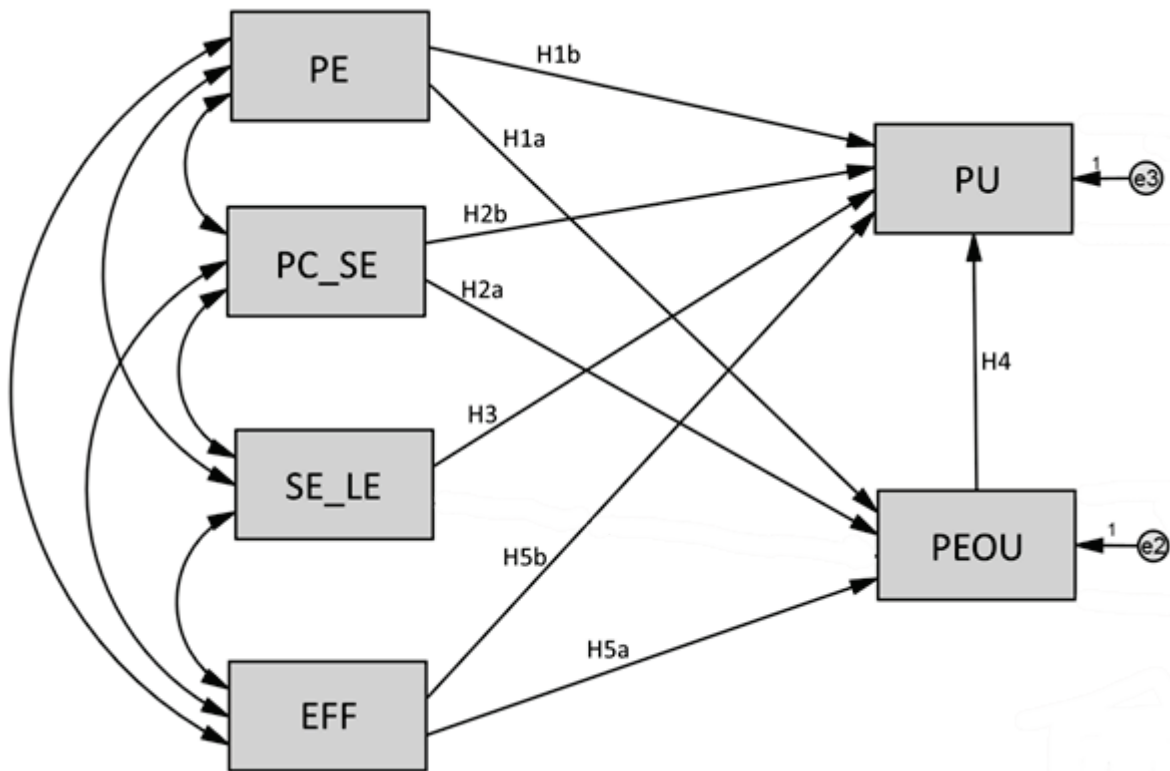


Abbildung 38: *Vorgeschlagenes theoretisches Strukturmodell des TAM mit den möglichen Einflussvariablen auf die „wahrgenommene Nützlichkeit“ und die „wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“.*

EFF: Effort; H: Hypothese; PC_SE: Computer Self-efficacy; PE: Perceived Enjoyment; PEOU: Perceived Ease of Use; PU: Perceived Usefulness; SE_LE: Self-efficacy im Sinne des Lernerfolgs.

Perceived Enjoyment

PE wurde definiert als der Grad, zu dem eine Aktivität unter Verwendung eines Computersystems als erfreulich/angenehm für sich selbst wahrgenommen wird. Verschiedene Arbeiten publizieren einen Einfluss dieser Komponente auf PEOU (u. a. Venkatesh 2000; Venkatesh et al. 2002; Venkatesh und Bala 2008). In der groß angelegten Metaanalyse von Abdullah und Ward (2016) bezüglich des TAM im E-Learning Kontext zeigen 73 % der Studien einen signifikanten Einfluss von „Enjoyment“ auf die Komponente PEOU mit einem durchschnittlichen Pfadkoeffizienten von $\beta = 0,260$.

H1a: Es wird ein positiver Einfluss PE \rightarrow PEOU vorgeschlagen.

Der Effekt von PE auf PU wird in den Arbeiten zum TAM seltener untersucht. Die Metaanalyse von Abdullah und Ward (2016) zeigt aber, dass alle 8 Studien, die dies untersucht haben, einen signifikanten Effekt finden mit einem sogar relativ starken durchschnittlichen Pfadkoeffizienten von $\beta = 0,418$. Yi und Hwang (2003) diskutieren, dass das multidimensionale Konstrukt der „Cognitive Absorption“ von Agarwal und Karahanna einen signifikanten Einfluss auf PU zeigt und dass die Sub-Dimension „Enjoyment“ einen der größten Ladungswerte des Konstrukts aufweist.

H1b: Es wird ein positiver Einfluss PE \rightarrow PU vorgeschlagen.

Computer Self-efficacy

Die Items der „Computerselbstwirksamkeit“ in den Arbeiten zur Technologieakzeptanz gestalten sich anders als in der vorliegenden Arbeit (z. B. „*I could complete the job using a software package if someone showed me how to do it first*“, Venkatesh und Bala 2008, S. 313). Jedoch trifft die gängige Definition der Komponente auch auf die in der vorliegenden Arbeit gebildete Komponente zu, sodass sie folglich für die Analyse verwendet wird. Bandura (1982) definiert Selbstwirksamkeit als die individuelle Einschätzung der eigenen Möglichkeiten zur Durchführung einer spezifischen Aufgabe. In dem hier vorliegenden Kontext wird die Komponente PC_SE definiert als der Grad, zu dem der Benutzer glaubt, mit Computern und Computersoftware zurechtzukommen (vgl. mit der Definition von Venkatesh und Bala 2008, S. 297: „*The degree to which an individual believes that he or she has the ability to perform a specific task/job using the computer*“). Nach Yi und Hwang (2003) ist dabei zu differenzieren, dass es sich in dem Fall um eine generelle Computerselbstwirksamkeit und nicht um eine applikationsspezifische handelt.

In mehreren Arbeiten wird ein Einfluss von PC_SE auf PEOU bestätigt (u. a. Venkatesh 2000; Venkatesh und Bala 2008). In der Metaanalyse von Abdullah und Ward (2016) zeigen 80 % der Studien einen signifikanten Einfluss von PC_SE auf PEOU mit einem durchschnittlichen Pfadkoeffizienten von $\beta = 0,342$. Venkatesh (2000) argumentiert damit, dass die Komponente PEOU weitreichend durch ein vorhandenes Vertrauen in die eigenen „Computerfähigkeiten“ bestimmt wird und auch nach gesammelten Erfahrungen an einem System nachhaltig davon beeinflusst wird. In seiner Studie waren die allgemeinen Überzeugungen einer Person in Bezug auf Computer die stärksten Determinanten für die systemspezifische „wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“.

H2a: Es wird ein positiver Einfluss PC_SE \rightarrow PEOU vorgeschlagen.

In vielen Arbeiten finden sich keine oder nur minimale Einflüsse von PC_SE auf PU (u. a. Venkatesh und Bala 2008). In der Metaanalyse von Abdullah und Ward (2016) zeigt sich entsprechend in 63 % der Studien keine signifikante Beziehung zwischen den beiden Komponenten. Bezüglich der Studien mit Studierenden findet sich aber zumindest ein durchschnittlicher Pfadkoeffizient von $\beta = 0,174$ (vgl. Park 2009). Daher wird der Einfluss im vorgeschlagenen Modell entsprechend berücksichtigt.

H2b: Es wird ein positiver Einfluss PC_SE \rightarrow PU vorgeschlagen.

Self-efficacy

Die „Self-efficacy“ ist in der LMS definiert als das Urteil einer Person über ihre eigenen Fähigkeiten und bezieht sich in der vorliegenden Arbeit vornehmlich auf den selbsteingeschätzten inhaltlichen und praktischen Lernerfolg (SE_LE). Ebenfalls in direktem Bezug zur Lerneffizienz steht die in der vorliegenden Arbeit angewandte Definition der Komponente PU: Der Grad, zu dem ein Schüler glaubt, dass die Verwendung der Simulationsumsetzung sein Lernvermögen steigert (Diwakar et al. 2014; Park 2009). Setzt man diese Definitionen zueinander in Bezug, kann eine positive Bewertung der „wahrgenommenen Nützlichkeit“ als direkte Folge einer positiven Bewertung des „Lernerfolgs“ angesehen werden.

Agudo-Peregrina et al. (2014) beschreiben dazu, dass sie die häufig verwendete Komponente der „Job Relevance“ (vorgestellt von Venkatesh und Davis 2000) im Kontext von E-Learning als „Relevance for Learning“ benennen und die Items entsprechend anpassen. Sie definieren die Komponente als den Grad, zu dem ein Lernender die Benutzung eines E-Learning Systems als geeignet zum Lernen und Ausführen von lernbezogenen Aufgaben betrachtet. Ihrer Meinung nach ist die

Komponente verbunden mit der „wahrgenommenen Nützlichkeit“, da die Möglichkeit des Systems, die Lernbedürfnisse der Studierenden zu erfüllen, Grundbedingung dafür ist, dass das System als nützlich bewertet wird. Nach diesen beiden Ansätzen wird folgende Hypothese aufgestellt.

H3: Es wird ein positiver Einfluss SE_LE → PU vorgeschlagen.

Perceived Usefulness & Perceived Ease of Use

PEOU ist definiert als der Grad, zu dem ein Schüler glaubt, dass die Verwendung der Simulationsumsetzung frei von kognitiver Anstrengung ist (vgl. Davis 1989; Diwakar et al. 2014; Park 2009). Ausgehend vom TAM nach Davis (1989) bestätigen viele Arbeiten den Einfluss von PEOU auf PU (u. a. Davis et al. 1989; Lee et al. 2005; Venkatesh 2000). Diese Beziehung gründet sich auf die Annahme, dass Benutzer ein System als nützlicher empfinden, je freier es von Anstrengungen ist.

H4: Es wird ein positiver Einfluss PEOU → PU vorgeschlagen.

Effort

Nach der Definition in der LMS gehört „Effort“ zur extrinsischen Motivation und bezieht sich darauf, wie viel Mühe die Schüler in die Arbeit mit der Simulationsumsetzung investieren müssen. Die Definition steht demnach in direktem Bezug zur Definition von PEOU. Bei der Betrachtung der Einzelitems der Komponente „Effort“ ist festzustellen, dass eine positive Bewertung der Komponente für eine Arbeit mit der Simulationsumsetzung spricht, die frei von Bemühung und Anstrengung ist. Demzufolge eine positive Bewertung der Komponente „Effort“ einen positiven Einfluss auf die „wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“ zur Folge haben.

H5a: Es wird ein positiver Einfluss EFF → PEOU vorgeschlagen.

Der oben dargestellten Theorie folgend, dass Benutzer ein System als nützlicher empfinden, je freier es von Anstrengungen ist, wird dies in Bezug auf die Komponente „Effort“ ebenfalls im Modell berücksichtigt.

H5b: Es wird ein positiver Einfluss EFF → PU vorgeschlagen.

11.2 Ergebnisse des SEM

Für eine Betrachtung von möglichen Einflussvariablen auf die beiden Kernkomponenten PU und PEOU des TAM wurde ein SEM aufgestellt und berechnet (**Abbildung 39**). Im Modell berücksichtigt wurden die potenziellen Prädiktorvariablen PE (TAM), EFF(LMS), SE_LE (LMS) sowie die PC_SE (abgeleitet vom TAM). Die Stichprobengröße entspricht der Stichprobe der TAM-Erhebung, die sich zu 100 % in der LMS-Erhebung wiederfindet (n = 193; W = 126; M = 67; LK = 158; GK = 35). Die in der LMS-Erhebung zusätzlichen Schüler werden aus der Modellanalyse ausgeschlossen. Für die Berechnung des Modells müssen endogene Größen, auf die eine andere Variable einwirkt, mit einem möglichen Fehler assoziiert sein (Bühner 2011), die in **Abbildung 39** mit „e1-e32“ gekennzeichnet sind. Sie dienen zur Modellierung der nicht erklärten Varianz der Variablen.

Tabelle 23: Beurteilungskriterien (Cut-off-Werte) und Fit-Werte für das überprüfte Strukturgleichungsmodell in Abb. 39.

Fit-Indizes	Cut-off-Werte	Fit-Werte des berechneten SEM
χ^2		704,865 *** $p < 0,001$
df		391
Chi-square/df	$< 3^1$	1,80
CFI	$\sim 0,95$ oder größer ²	0,892
RMSEA	$< 0,08$ (für $n < 250$) ²	0,065
SRMR	$< 0,08^2$	0,0748

Cut-off-Werte nach 1: Carmines und McIver 1981, 2: Hu und Bentler 1999.

Tabelle 23 zeigt die Fit-Werte der Modellberechnung und die definierten Cut-off-Werte. Wie bereits diskutiert, reagiert der Signifikanztest des Chi-Quadrat-Tests sensitiv auf die Stichprobengröße und die geforderte Normalverteilung. Die anderen Kriterien eignen sich besser zur Beurteilung des aufgestellten Gesamtmodells. Diese Fit-Werte liegen im akzeptablen bis überwiegend guten Bereich. Das Modell kann damit als plausibel angesehen werden und die Schätzungen der Zusammenhänge können analysiert werden.

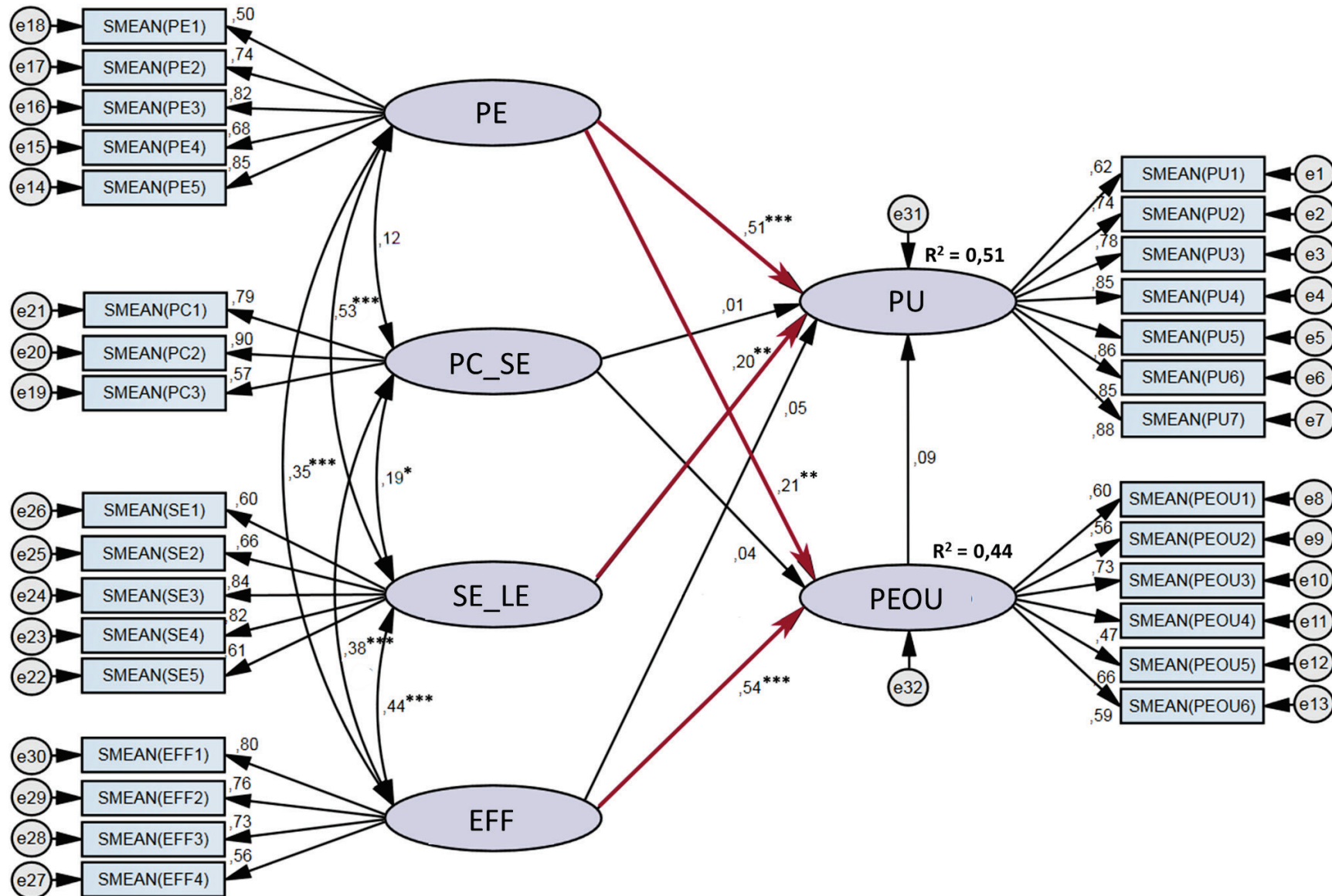


Abbildung 39: Strukturgleichungsmodell des TAM mit den vorgeschlagenen Einflussvariablen auf die Kernkomponenten PU und PEOU. $n = 193$. Angegeben sind die standardisierten Koeffizienten der Regressionsgewichte β bzw. der Korrelationen r sowie die zugehörigen Signifikanzniveaus (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$).

Das Messmodell der konfirmatorischen Faktorenanalyse im Rahmen des SEM bestätigt die guten Gewichtungen der Einzelitems zur jeweiligen Komponente und soll nicht mehr im Detail betrachtet werden. Im Strukturmodell finden sich vier signifikante Regressionsgewichte β auf die Komponenten PU und PEOU (basierend auf dem Critical Ratio-Wert). Auf die Komponente PU wirken PE stark ($PU \leftarrow PE$, $\beta = 0,51$; $***p < 0,001$) und SE_LE schwach ($PU \leftarrow SE_LE$, $\beta = 0,20$; $*p = 0,019$). Auf PEOU wirken EFF stark ($PEOU \leftarrow EFF$, $\beta = 0,54$; $***p < 0,001$) und PE schwach ($PEOU \leftarrow PE$, $\beta = 0,21$; $*p = 0,011$). Die Komponente PC_SE zeigt keine relevanten Einflüsse auf die TAM Kernkomponenten ($\beta < 0,05$). Alle anderen Regressionsgewichte liegen ebenfalls $\leq 0,5$ und sind daher zu vernachlässigen. Das Regressionsgewicht β von PEOU auf PU liegt in diesem Modell nur bei 0,09 und weist keine Signifikanz auf. Das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt an, dass in diesem Modell 51 % der Varianz von PU und 44 % der Varianz von PEOU erklärt werden können. Die Korrelationen zwischen den Prädiktorvariablen sprechen für ihre gegenseitige Beeinflussung, wobei die Komponenten SE_LE und PE besonders stark korrelieren ($r = 0,53$; $***p < 0,001$). Im Gegensatz zu den nicht vorhandenen Einflüssen auf die TAM Kernkomponenten zeigt PC_SE geringe Korrelationen mit anderen Einflussvariablen. Bedeutend ist hier die Beziehung mit SE_LE ($r = 0,19$) beziehungsweise EFF ($r = 0,38$; $***p < 0,001$). Die größere Korrelation zeigen EFF und SE_LE jedoch miteinander ($r = 0,44$; $***p < 0,001$). Die Regressionsgewichte der vorgeschlagenen Pfade, die zugehörigen p -Werte und die Bewertung der Hypothesen ist in **Tabelle 24** zusammengefasst.

Tabelle 24: Bewertung der vorgeschlagenen Hypothesen des SEM in Abhängigkeit von den berechneten p -Werten.

Hypothese		Standardisiertes Regressionsgewicht β	p -Wert	Bewertung der Hypothese
H1b	PE \rightarrow PU	0,51	< 0,001***	Angenommen
H2b	PC_SE \rightarrow PU	0,01	0,924	Abgelehnt
H3	SE_LE \rightarrow PU	0,20	0,019*	Angenommen
H5b	EFF \rightarrow PU	0,05	0,578	Abgelehnt
H1a	PE \rightarrow PEOU	0,21	0,011*	Angenommen
H2a	PC_SE \rightarrow PEOU	0,04	0,635	Abgelehnt
H5a	EFF \rightarrow PEOU	0,54	< 0,001***	Angenommen
H4	PEOU \rightarrow PU	0,09	0,322	Abgelehnt

Die **Tabelle** zeigt, dass vier der vorgeschlagenen acht Hypothesen angenommen werden können. Zwei der Regressionsgewichte β sind als große Effektstärke zu bewerten: $PE \rightarrow PU$ und $EFF \rightarrow PEOU$. Die Effektstärken der beiden anderen signifikanten Regressionsgewichte sind nach Cohen (1988, 1992) als klein einzustufen: $SE_LE \rightarrow PU$ und $PE \rightarrow PEOU$.

11.3 Zusammenfassung der Ergebnisse des SEM

Die Fit-Werte des Modells liegen überwiegend im guten Bereich, sodass das Modell als plausibel angesehen werden kann und das TAM grundsätzlich bestätigt wird. Es erklärt 51 % der Varianz der „wahrgenommenen Nützlichkeit“ (PU) und 44 % der Varianz der „wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit“ (PEOU). Die „wahrgenommene Freude“ (PE) zeigt einen Einfluss auf beide Kernkomponenten des TAM (PEOU und PU). Der „wahrgenommene Lernerfolg“ (SE_LE) wirkt auf die „wahrgenommene Nützlichkeit“ und die „benötigte Anstrengung“ beim Arbeiten mit der Simulation (EFF) auf die „wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“. Die „Computerselbstwirksamkeit“ (PC_SE) zeigt keinen Einfluss auf die Kernkomponenten, weist aber nennenswerte Korrelationen mit dem „wahrgenommenen Lernerfolg“ und der „benötigten Anstrengung“ beim Arbeiten mit der Simulation auf, sodass eine indirekte Wirkung vorhanden ist. Weitere nennenswerte Korrelationen der Prädiktorvariablen finden sich zwischen der „wahrgenommenen Freude“, dem „Lernerfolg“ sowie der „benötigten Anstrengung“ beim Arbeiten mit der Simulation. Ein Einfluss der „wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit“ auf die „wahrgenommene Nützlichkeit“ konnte im vorliegenden Modell nicht bestätigt werden.

Diskussion

12 Praxisanteil und Schülerexperimente

Die Pisa-Studie von 2006 zeigt, dass ein Konflikt zwischen Interessensgenese und Wissensgenese bei Schülern besteht. Traditioneller, inhaltsorientierter Unterricht erbringt gute Leistungen der Schüler in den Testergebnissen, führt aber gleichzeitig zu einem starken Einbruch des Interesses. Praxisorientierter Unterricht dagegen fördert die Interessens- und Kompetenzentwicklung (Prenzel 2008). Die Defizite der deutschen Schüler sind meist nicht im Faktenwissen zu finden, sondern in den naturwissenschaftlichen Kompetenzbereichen Arbeiten, Modellbildung und -anwendung sowie in der Problemlösefähigkeit (Ringelband et al. 2001). Dieser Befund kann aus einer mangelnden Praxiserfahrung in Schulen resultieren und für das sinkende Interesse der Schüler an Naturwissenschaften verantwortlich sein (Braund und Reiss 2006). Allerdings wurde in der vorliegenden Arbeit für den Bereich der Neurobiologie aufgezeigt, dass hier Defizite auch im inhaltlichen Verständnis bei den Schülern auftreten (u. a. Cardozo 2016). Für die Neurobiologie ist es daher von besonderer Bedeutung, sowohl das Wissen als auch das Interesse der Schüler zu fördern.

Für eine Einschätzung des Praxisanteils im Biologieunterricht an Schulen finden sich wenig aktuelle Studien – insbesondere im Bereich der Sekundarstufe II. „*Von Experimentalunterricht (...) im eigentlichen Sinne ist hier die Rede, wenn Schüler einzeln oder in Gruppen diese Tätigkeit durchführen. Dies wird allgemein als 'Schülerexperiment' (auch Realexperiment) bezeichnet. Dem steht das 'Demonstrationsexperiment' gegenüber*“ (Berck und Graf 2018, S. 214). Berck und Graf (2018) fassen zusammen, dass einige Studien einen maximalen Praxisanteil von 20 % im Biologieunterricht aufzeigen. In späteren Studien fiel der Anteil bei ca. 50 % der Lehrkräfte unter 10 % (S. 215). Korneck und Heibel (2002) zeigen ebenfalls auf, dass der experimentelle Anteil im Schulunterricht für die Biologie – im Vergleich zum Chemie- oder Physikunterricht – relativ gering ausfällt. Dies betraf in der Studie sowohl Lehrer- als auch Schülerexperimente. In der Pisa-Studie 2015 – die den experimentellen Anteil in der Schule bei 15-Jährigen erhebt – gaben lediglich 13 % der Jugendlichen an, dass sie häufig selbstständige Experimente durchführen (Schiepe-Tiska et al. 2016). In der Arbeit von Scharfenberg (2005) gaben etwa 60 % der Oberstufenschüler (12. Klasse) an, dass Schülerexperimente „gar nicht“ bis „selten“ durchgeführt werden. Der Anteil der Demonstrationsexperimente fiel wesentlich höher aus – etwa 90 % der Schüler gaben eine „gelegentliche“ bis „häufige“ Durchführung an. Jedoch stellt Scharfenberg die Daten nicht differenziert für Biologie, Chemie und Physik dar. Im Artikel von Dierkes (2010) wird beschrieben, dass die Quantifizierung von naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen

im Rahmen von schulpraktischen Studien zeigt, dass eine Abnahme der Arbeitsweise „Experimentieren“ in höheren Klassenstufen erfolgt. So sank der prozentuale Anteil im Unterricht von 12–23 % (Klasse 5–7) auf 6–10 % (Klasse 9–13), wobei 37 % der Experimente als Demonstrationsexperimente durchgeführt werden. Eine differenzierte Betrachtung des Praxisanteils bezüglich unterschiedlicher Themenfelder der Biologie konnte in der Literatur nicht gefunden werden. Jedoch wäre hierzu eine Analyse von besonderem Interesse, da viele außerschulische Lernorte den Praxismangel in der Schule als gegeben annehmen und diesem entgegenwirken wollen. Durch eine umfassende Analyse des tatsächlichen Bedarfs an experimentellen Umsetzungen könnten die Angebote von außerschulischen Lernorten bedarfsorientierter ausgerichtet werden.

Um dazu eine erste bessere Einschätzung zu erhalten, wurden die Lehrkräfte gefragt, zu welchen Themenfeldern der Hessischen Curricula für Biologie sie Schülerexperimente und/oder Demonstrationsexperimente im Schulunterricht anbieten (vgl. Kapitel 7.1). Die Erhebung ergab, dass für viele Themenfelder der Sekundarstufe I die Mehrzahl der Lehrkräfte Schülerexperimente anbieten (u. a. „Zellen und Gewebe“, „Sinnesphysiologie“), die Themenfelder der Sekundarstufe II dagegen seltener durch Schülerexperimente begleitet werden. Dies betrifft neben der Ökotoxikologie und der Evolution im Besonderen die Bereiche der Neurowissenschaften. Nur 18 % der Lehrkräfte gaben an, zum Themenfeld der Nervenzellen Schülerexperimente durchzuführen. Insgesamt bieten zumindest 30 % der Lehrkräfte Schüler- und/oder Demonstrationsexperimente dazu an. Auch zur Verhaltensbiologie werden von nur 35 % der Lehrkräfte Schülerexperimente angeboten. Der Anteil der Demonstrationsexperimente fällt im Vergleich zur Erhebung von Scharfenberg (2005) wesentlich geringer aus. Der höchste Wert findet sich in der Zellbiologie mit knapp 50 %. Auch hier liegen die niedrigen Anteile im Bereich der höheren Sekundarstufe I bzw. II. Die Erhebungen unterscheiden sich aber insofern, als Scharfenberg und andere Studien untersucht haben, wie groß der Praxisanteil in Bezug zur Unterrichtszeit ausfällt. Die vorliegende Studie erhebt, wie viele Lehrkräfte zu den genannten Themenfeldern grundsätzlich Experimente anbieten. Demnach führen 70 % der befragten Lehrkräfte überhaupt keine Experimente für den Bereich der Nervenzellen durch. Die von Dierkes (2010) beschriebene Abnahme des experimentellen Unterrichts in der Sekundarstufe II bestätigt sich – nach Selbsteinschätzung durch die Lehrkräfte – nur eingeschränkt (vgl. **Tabelle 25**). Auch wenn sich im unteren Prozentbereich ausschließlich die Themenfelder der Q3 und Q4 finden, führen viele Lehrkräfte beispielsweise Experimente zu Diffusion und Osmose durch (86 %), die thematisch in der E-Phase angesiedelt sind. Die Themenfelder scheinen demnach für praktische Experimente unterschiedlich geeignet zu sein. Für ein differenzierteres Bild sollte in künftigen Studien – neben der Erhebung zu einzelnen Themenfeldern – expliziter betrachtet werden, wie viele Experimente von der einzelnen Lehrkraft durchgeführt werden, um so den Anteil im Unterricht genauer einschätzen zu können.

Weiterhin kann es von Interesse sein, welche dies genau sind, um beispielsweise die Authentizität der eingesetzten Experimente einschätzen zu können. Für die vorliegende Studie wäre es von Interesse gewesen, welche Versuche die Lehrkräfte im Bereich der Nervenzellen anbieten, um die Experimente des „Schülerlabors Neurowissenschaften“ dazu in Bezug setzen zu können.

Tabelle 25: Prozentualer Anteil der befragten Lehrkräfte (n = 66), die zu den genannten Themenbereichen Schülerexperimente durchführen und die Zuordnung zu den Themenfeldern des Hessischen Kerncurriculum (Hessisches Kultusministerium o. J., 2016).

Themenbereich	Zuordnung zu den Themenfeldern des Kerncurriculum	Schülerexperimente (Prozentualer Lehreranteil)
Zellen und Gewebe	7.1	97
Zellbiologie (Diffusion & Osmose)	E1/E2	86
Sinnesphysiologie (Auge)	9.1	80
Photosynthese und Zellatmung	7.2 / Q2.2	79
Genetik	Q1	61
Sinnesphysiologie (Ohr)	9.1	42
Zellbiologie (Histologie/Färbemethoden)	E.1	41
Verhaltensbiologie	Q3.2	35
Blut und Immunsystem	9.2	35
Humanbiologie (Elektrophysiologie von Herz & Muskel)	(Q3.1)	17
Neurobiologie (Nervenzellen)	Q3.1	15
Umwelt und Mensch (z. B. Ökotoxikologie)	Q2.3	14
Evolution	Q4	6
Neurobiologie (Gehirn)	Q3.4	3

Als Gründe für den häufig geringen experimentellen Anteil in den Naturwissenschaften werden von Lehrkräften u. a. mangelnde Ressourcen aufgeführt, wie beispielsweise Zeit und Ausstattung. Aber auch eine mangelnde Ausbildung und Überforderung spielen eine Rolle (Chinn und Malhotra 2002; Hofstein und Lunetta 2004). Für die Verhaltensbiologie ist die Zeitkomponente entscheidend, da die Versuche sowohl in der Vorbereitung durch die Lehrkraft aufwändig sind, als auch in der Durchführung ausreichend Zeit benötigen und somit im Rahmen einer Schulstunde schwierig umzusetzen sind. Der Einsatz von wirbellosen Tieren, mit denen man nachweislich anschauliche Experimente zur Verhaltensbiologie durchführen kann (u. a. Reinke-Nobbe 2007), ist grundsätzlich unter schulischen Rahmenbedingungen möglich und bedarf nach den „*Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht*“ (Sekretariat der Kultusministerkonferenz 2019) keiner weiteren Genehmigung. Weiterhin könnte die anschließende notwendige Pflege und Unterbringung der Tiere für einige Lehrkräfte ein Hindernis darstellen. Die angeführten Gründe wirken sich besonders auf den Bereich der Neurobiologie aus. Die limitierten Ressourcen betreffen elektrophysiologische Experimente im besonderen Maße. Neben den Kosten für die benötigte Ausstattung (vgl. Diwakar et al. 2014) ist der benötigte Zeitaufwand für die Experimente immens (vgl. Diwakar et al. 2016) und zudem gestalten sie sich technisch und methodisch sehr anspruchsvoll (Diwakar et al. 2014; Lewis 2014). Auf dieser Basis stellen sich die neurobiologischen Themen für die Lehrkräfte als wünschenswerte bis sehr wünschenswerte Angebote in einem Schülerlabor dar (vgl. Kapitel 7.1). Der Wunsch nach einem praktisch-experimentellen Zugang zur Verhaltensbiologie oder nach Versuchen mit Nervenzellen wurde besonders hoch bewertet. Als noch relevanter wurden nur die Bereiche der Photosynthese und der Genetik genannt (vgl. Euler 2010).

12.1 Neurobiologie an außerschulischen Lernorten

Pawek (2009) führt aus, dass außerschulische Lernorte nicht den schulbedingten Schwierigkeiten unterliegen, wie Lehrplanvorgaben oder Zeitlimitationen durch Schulstunden; sie böten eine bessere Ausstattung von Geräten und Räumlichkeiten. Dies muss jedoch etwas differenzierter betrachtet werden – auch Universitäten unterliegen vielen der beschriebenen Limitationen, was im Rahmen eines Schülerlabors nicht umfassend überwunden werden kann. So zeigte die Recherche zu Angeboten in deutschen Schülerlaboren, dass nur 10 % der außerschulischen Lernorte Experimente zur Neurobiologie anbieten, wobei dies die elektrophysiologischen und neurophysiologischen Inhalte ebenso betrifft wie die verhaltensbiologischen (vgl. Kapitel 2.4). Für die Sekundarstufe II bieten nur 5 % der Lernorte neurobiologische Themen an und nur 2 % der Lernorte ermöglichen Schülern Erfahrungen mit intrazellulären, elektrophysiologischen Messungen. Ebenfalls überraschend gering

abgedeckt sind auch verhaltensbiologische Versuche. Nur 1 % der Lernorte bietet die Durchführung von Verhaltensstudien mit Tieren an.

Ausgehend von dem beschriebenen Mangel an experimentellen Zugängen zur Neuro- und Verhaltensbiologie wurde das „Schülerlabor Neurowissenschaften“ konzipiert, um Schülern die Möglichkeit zu geben, sich praktisch-experimentell mit dem Themenfeld der Neurobiologie auseinanderzusetzen und neurowissenschaftliche Forschung durch den eigenen Umgang mit modernen Forschungsapparaturen zu erfahren. Besonderer Fokus lag hierbei auf der Entwicklung des EPhys-Setups, um Schülern einen authentischen praktischen Zugang zur elektrophysiologischen Forschung zu ermöglichen.

12.2 Forderung nach experimentellen Zugängen

Warum wird überhaupt fortwährend mehr Praxis für die naturwissenschaftlichen Fächer gefordert? Berck und Graf (2018) beschreiben die Bedeutung von Experimenten für den Biologieunterricht ähnlich wie Killermann et al. (2009) (vgl. **Abbildung 2**, Kapitel 1.2; u. a. *Förderung der biologischen Fragehaltung & des Interesses; Vertiefung der Kenntnisse biologischer Erscheinungen & Zusammenhänge*). Die Autoren erklären, dass es eine unübersehbare Anzahl an empirischen Studien gibt, die belegen – oder versuchen zu belegen –, „dass diese Fähigkeiten durch Experimentalunterricht auch tatsächlich erreicht werden“ (S. 216). Berck und Graf führen weiter aus, dass die Ergebnisse überwiegend zweideutig waren, neuere Untersuchungen jedoch durchaus zu positiven Ergebnissen kommen. Michael (2006) bietet ein Review, in dem er kritisch der Frage nachgeht „*Where's the evidence that active learning works?*“. Er belegt mit mehreren Studien, dass aktive Arbeit in den Naturwissenschaften im Vergleich zum herkömmlichen, lehrerzentrierten Unterricht vielfältige Vorteile bietet. Mit Fokus auf die Physiologie erklärt er, dass aktive schülerzentrierte Tätigkeiten sich zum Unterrichten von Physiologie besser eignen als passive Ansätze. Der Autor definiert aktives Lernen als den Prozess, bei dem die Lernenden mit einer Tätigkeit beschäftigt sind, die sie dazu bringt, Ideen zu reflektieren und zu überlegen, wie sie diese Ideen anwenden können. Es fordert Lernende dazu auf, ihre eigenen Kenntnisse und Fähigkeiten im Umgang mit Konzepten oder Problemen in einer bestimmten Disziplin zu beurteilen. Wissen wird erlangt durch Beteiligung oder Mitwirkung. Aktives Lernen beschreibt einen Prozess, bei dem die Lernenden geistig und oft körperlich aktiv beim Lernen gehalten werden – durch Tätigkeiten, bei denen sie in die Informationserfassung, das Nachdenken und Problemlösen involviert werden (Michael 2006, S. 160). Lewis (2014) listet in seinem Review die Vorteile von praktischen Ansätzen auf und betont, dass dies für die Arbeit im Labor, im Feld oder *in silico* zutrifft. Darunter finden sich Argumente wie die Stärkung des Wissens und der Kenntnisse über Materialien und

Konzepte; die Anwendung des Wissens; die Möglichkeit, fachspezifische Kompetenzen in experimentellen Fertigkeiten zu entwickeln; die Wissensgenerierung bezüglich experimenteller Aufbauten, Datenerfassung und –analyse (S. 5). Demnach wird auch eine Steigerung der Lerneffektivität angenommen (vgl. Killermann et al. 2009). Die motivations- und interessenfördernde Wirkung des Schülerexperiments wird als bedeutsam erachtet (vgl. Euler 2005; Glowinski 2007). Neves et al. (2017) betonen, dass praktische Tätigkeiten den Lernenden ermöglichen, die Theorie mit der Praxis zu verbinden. Hands-on Tätigkeiten werden auch die Förderung von biologierelevanten Interessen zugesprochen (Bergin 1999). Krontiris-Litowitz (2003) fasst zusammen, dass passives Lernen unzureichend für ein wirkliches Verständnis und die Aneignung von problemlösenden Fähigkeiten ist. Die Effizienz des Lernens wird mit aktiven Ansätzen erhöht. Im Rahmen von Forschungsarbeiten aus dem außerschulischen Bereich fassen Priemer et al. (2007) zusammen, dass Praxis im Besonderen das Interesse fördert. Als wesentlichen Aspekt für den Erfolg nennen die Autoren weiterhin das selbstständige Experimentieren der Schüler an authentischen Orten der Wissenschaft. Die Teilnehmer der Studie gaben die Authentizität häufig als Begründung bei offenen Antwortmöglichkeiten an.

12.3 Feedback der Lehrkräfte zu den SLT Konzepten

Der Wunsch nach SLT für Themenfelder der Neurobiologie seitens der Lehrkräfte lag im Mittelwert für die Verhaltensbiologie (MW = $3,51 \pm 0,81$; 4-stufige LS) gering über den Themenfeldern der Neurobiologie/Nervenzellen (MW = $3,47 \pm 0,74$) und der Humanbiologie/Elektrophysiologie (MW = $3,35 \pm 0,83$; vgl. Kapitel 7.1). Dies spiegelt sich im Feedback der Lehrkräfte zu den SLT wider (vgl. Kapitel 7.2). Das Item „*Der heutige Labortag sollte als dauerhaftes Angebot auch in kommenden Jahren bestehen bleiben*“ wurde für die SLT „Verhalten“ (entspricht Themenfeld „Verhaltensbiologie“) und „Elektrophysiologie“ (entspricht Themenfeld „Neurobiologie/Nervenzellen“) äquivalent bewertet (MW = $3,94 \pm 0,24$; 4-stufige LS) und für den SLT „Summenpotenzial“ (entspricht Themenfeld „Humanbiologie/Elektrophysiologie“) etwas geringer (MW = $3,73 \pm 0,44$). In weiteren Items finden sich diese Unterschiede ebenfalls entsprechend des Wunsches nach SLT. Die Bewertungen für den SLT „Verhalten“ fallen für einige Items etwas höher aus (z. B. „*Inhalte lassen sich in den Unterricht integrieren*“; „*Weiterempfehlung an Kollegen/Innen*“), die Bewertungen für den SLT „Summenpotenzial“ fallen für einige Items etwas geringer aus (z. B. „*Anregungen für den eigenen Unterricht*“; „*Mit erzielten Ergebnissen zufrieden*“). Eine Erklärung für die niedrigeren Bewertungen des SLT „Summenpotenzial“ könnte darin liegen, dass die dort behandelten Inhalte (humanbiologische Elektrophysiologie) nicht explizit im Hessischen Kerncurriculum gefordert sind (vgl. Hessisches Kultusministerium 2016). Die Unterschiede weisen zwar keine Signifikanzen auf,

bestätigen jedoch den offenbar vorliegenden Bedarf, nach Verhaltensexperimenten außerhalb des schulischen Rahmens. Entsprechend bewerten die Lehrkräfte den „Zugewinn an neuen Methoden“ für die Schüler am SLT „Verhalten“ mit dem Maximalwert $4,0 \pm 0$. Im Vergleich zu dieser hohen Bewertung ist es fast überraschend, dass der SLT „Elektrophysiologie“ nicht gleichartig bewertet wird. Es ist davon auszugehen, dass den Schülern sowohl der Zugang zu elektrophysiologischen Messungen als auch zur eingesetzten virtuellen Mikroskopie gänzlich neu ist. Für sich selbst schätzen die Lehrkräfte den „Zugewinn an neuen Inhalten und Methoden“ geringer ein als für ihre Schüler – sie schreiben sich größere, bereits vorliegende Kenntnisse zu. Für die Inhaltskenntnisse ist dies nicht überraschend, da den Lehrkräften die grundlegenden Inhalte vertraut sein sollten. Von Interesse ist jedoch, dass beide Items Werte im mittleren Bereich aufweisen ($MW_{\text{Inhalte}} = 3,00 \pm 0,83$; $MW_{\text{Methoden}} = 2,71 \pm 1,02$; 4-stufige LS). Dies deutet darauf hin, dass die Inhalte und Methoden teilweise über schulische Rahmenforderungen hinausgehen. Die Bewertung für den SLT „Elektrophysiologie“ fällt am höchsten aus (Neue Inhalte Lehrkräfte: $MW = 3,12 \pm 0,68$). Dies kann die thematische Unsicherheit der Lehrkräfte und bestehende Missverständnisse über grundlegende Konzepte der Elektrophysiologie widerspiegeln (vgl. MacNabb et al. 2006). In der Gesamtbetrachtung wurden alle drei SLT sehr positiv bewertet. Besonders hoch bewerteten die Lehrkräfte die „Ergänzung zum eigenen Fachunterricht“ ($MW = 4,00 \pm 0,20$) und die „Option eines dauerhaften Angebotes“ ($MW = 3,90 \pm 0,33$) – die Konzepte entsprechen demnach offenbar den Anforderungen der Lehrkräfte. So wird auch die „Weiterempfehlung an Kollegen/Innen“ hoch bewertet ($MW = 3,82 \pm 0,44$).

13 Feedback der Schüler

13.1 Qualität der SLT und Einfluss des „Ausgangsinteresses“

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die drei SLT der Sekundarstufe II wissenschaftlich begleitet. Der SLT „Verhalten“ ist forschend-entdeckend gestaltet. Die zentrale Rolle des Experiments für die Naturwissenschaften wird folglich berücksichtigt. So wird den Schülern der prozedurale Ablauf der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung vermittelt, um ihre Fähigkeiten in diesem Bereich zu stärken (Schiepe-Tiska et al. 2016). Der SLT „Summenpotenzial“ bietet den Schülern die Möglichkeit, ihren eigenen Körper zu untersuchen und damit einen Bezug zu ihrer Lebenswelt herzustellen. Dieser Bezug gilt als wichtiger Ansatzpunkt für den Aufbau naturwissenschaftlicher Kompetenzen (vgl. Schiepe-Tiska et al. 2016). Der SLT „Elektrophysiologie“ legt besonderen Wert auf die Vermittlung von authentischen Forschungsmethoden, um dem wichtigen Ziel der naturwissenschaftlichen

Bildung gerecht zu werden, Schülern ein authentisches Bild von Forschung zu vermitteln (u. a. Chinn und Malhotra 2002; vgl. Kapitel 1.2).

Die geforderte praktische Vermittlung für naturwissenschaftliche Fächer zeigt in der vorliegenden Arbeit vielfältige positive Effekte auf die Schüler. Im offenen Feedback zum SLT „Elektrophysiologie“ gaben 28 % der Schüler den Praxisanteil als Rückmeldung zu den Stärken der Veranstaltung an und äußerten den Wunsch nach noch mehr praktischen Anteilen (vgl. Kapitel 8.3). Wichtige Grundlage für die Rückmeldungen zur Qualität der SLT seitens der Schüler bietet der nicht vorhandene Unterschied in der Komponente des „Ausgangsinteresses an Biologie & Forschung“ zwischen den Stichproben der drei SLT. Auch die Bewertung der Interessensänderung sowie die Benotung unterscheiden sich für die SLT nicht. Die Leistungskursschüler geben mit kleiner Effektstärke ($**r = 0,17$) ein höheres „Ausgangsinteresse“ an, die Grundkursschüler dagegen eine höhere Interessensänderung ($*r = 0,10$). Aufgrund der gleichmäßigen Verteilung auf die SLT heben sich diese Unterschiede auf. Priemer et al. (2007) zeigen, dass innerhalb eines Schülerlabors die konzeptionell und inhaltlich unterschiedlich angelegten Angebote zu signifikant unterschiedlichen Ergebnissen im situationalen Interesse führen können. Die Unterschiede liegen jedoch fachübergreifend vor. Innerhalb eines Fachs fanden sich nur Unterschiede bezüglich der Chemieangebote. In der Studie der vorliegenden Arbeit bewerteten die Schüler die drei untersuchten SLT sehr positiv (vgl. Kapitel 8.1). Als besonders positiv wurden die „Strukturierung der Inhalte und ihre Anschaulichkeit“ sowie die „Wissensvermittlung durch die Lehrperson“ empfunden. Zwischen den drei Konzepten finden sich nur geringe Unterschiede in den Bewertungen. Der SLT „Elektrophysiologie“ zeigt in der Komponente „Strukturierung“ signifikant kleinere Werte als die beiden anderen SLT ($**r_{\text{Summenpotenzial}} = 0,16$; $*r_{\text{Verhalten}} = 0,18$). Entsprechend finden sich im offenen Feedback zum SLT „Elektrophysiologie“ viele Äußerungen bezüglich thematischer Verständnisprobleme, Schwierigkeiten bei der Auswertung der Messspuren oder des großen Umfangs der Inhalte. 30 % der Schüler gaben die Versuche der Simulationsumsetzungen als Versuche an, mit denen sie Probleme hatten, und spezifizierten im offenen Feedback, dass die Probleme inhaltlicher Art waren (vgl. Kapitel 8.3). Diese Rückmeldungen bestätigen die angenommenen Verständnisprobleme der Schüler bezüglich der Inhalte der Elektrophysiologie (u. a. Cardozo 2016). Bestätigt wird dies weiterhin durch die Abhängigkeit der Bewertung der „Strukturierung“ vom „Ausgangsinteresse“ der Schüler am SLT „Elektrophysiologie“. Die sehr interessierten Schüler bewerten die Komponente signifikant höher als die interessierten Schüler ($**r = 0,23$). Nach dem Interessenmodell von Hidi und Renninger (2006) ändert sich mit der Entwicklung des Interesses auch das Wissen bezüglich des Interessengegenstands. Es muss angenommen werden, dass das angegebene „Ausgangsinteresse an Biologie & Forschung“ der Schüler nach dem vierstufigen Modell ein individuelles Interesse (entstehend/Stufe 3 oder gut entwickelt/Stufe 4) beschreibt. Die

Bedeutung des Interesses für das Lernen und die schulischen Leistungen der Schüler konnte in einer Metaanalyse von Krapp et al. (1993) bestätigt werden. Die Analyse zeigt eine Korrelation von $r = 0,16$ zwischen Interesse und Leistung für das Fach Biologie. Berck und Graf (2018) führen dazu aus: „Mehr Interesse bewirkt ein besseres schulisches Lernen und damit höheren Lernerfolg (...). Verschiedene empirische Studien (...) lassen erkennen, dass Interesse tiefergehendes Lernen, die Verwendung besserer Lernstrategien fördert und die Betroffenen aktiver lernen“ (S. 135). Nach Todt (1978) definieren Berck und Graf (2018) Interesse „als Verhaltens- und Handlungstendenzen, die relativ überdauernd sind,... die gerichtet sind auf verschiedene Gegenstands-, Tätigkeits- oder Erlebnisbereiche. (...) Sie sind ein Persönlichkeitsmerkmal“ (S. 138). Demnach können die sehr interessierten Schüler der „Strukturierung“ des SLT „Elektrophysiologie“, ausgehend von einem besseren inhaltlichen Verständnis, vermutlich besser folgen. Ferner findet sich eine weitere Abhängigkeit vom „Ausgangsinteresse“ – am SLT „Summenpotenzial“ bewerten die sehr interessierten Schüler die Qualität der „Wissensvermittlung“ im Vergleich zu den interessierten Schülern signifikant höher ($*r = 0,21$). Die Begründung entspricht der eben gegebenen für den SLT „Elektrophysiologie“, da sich auch am SLT „Summenpotenzial“ elektrophysiologische Inhalte finden. Der Argumentation folgend, fällt die „Wissensvermittlung“ ($***r_{\text{Summenpotenzial}} = 0,30$; $*r_{\text{Elektrophysiologie}} = 0,19$) sowie die „Lerndienliche Atmosphäre“ ($*r_{\text{Summenpotenzial}} = 0,21$; $*r_{\text{Elektrophysiologie}} = 0,17$) jeweils für den SLT „Verhalten“ im Vergleich zu den anderen SLT besser aus. Allerdings weisen die zwei aufgezeigten – vom „Ausgangsinteresse“ abhängigen – Unterschiede nur eine kleine Effektstärke auf, sodass festgehalten werden kann, dass die Qualität der drei Konzepte auch von den nicht interessierten Schülern positiv bewertet wird. Entsprechend liegen die Mittelwerte dieser Schüler in einzelnen Komponenten unter denen der anderen, aber in allen Fällen ≥ 3 , was einer mittleren bis positiven Bewertung entspricht (stimme in Teilen zu – stimme voll zu; 5-stufige LS). Ein ähnlicher Effekt zeigt sich in der beschriebenen höheren Bewertung der Interessensänderung seitens der Grundkurschüler, die zugleich ein niedrigeres „Ausgangsinteresse“ angeben (im Vergleich zu den Leistungskurschülern). Auch in der retrospektiven Prä-Post-Erhebung kann der beschriebene Effekt gefunden werden. Die Steigerung des Interesses vom Prä- zum Post-Wert findet sich an allen SLT in besonderem Maße für die Schüler, die einen niedrigen Prä-Wert aufweisen ($\Delta_{\text{Verhalten}} = 1,33$; $\Delta_{\text{Summenpotenzial}} = 1,49$; $\Delta_{\text{Elektrophysiologie}} = 1,28$; 5-stufige LS). Ein entsprechendes Bild zeigt sich für die Steigerung des Wissens und der Anwendungszuversicht, was einem signifikanten Lernzuwachs entspricht (Wissen: $\Delta_{\text{Verhalten}} = 2,24$; $\Delta_{\text{Summenpotenzial}} = 1,91$; $\Delta_{\text{Elektrophysiologie}} = 1,80$. Anwendungszuversicht: $\Delta_{\text{Verhalten}} = 1,86$; $\Delta_{\text{Summenpotenzial}} = 1,54$; $\Delta_{\text{Elektrophysiologie}} = 1,69$). Schließlich gaben die Grundkurschüler ein signifikant niedrigeres Prä-Wissen für den SLT „Summenpotenzial“ an ($*r = 0,16$), das sich jedoch im Post-Wissen nicht mehr zeigte. Die Konzepte der SLT werden demnach größtenteils unabhängig vom „Ausgangsinteresse“ positiv bezüglich ihrer Qualität bewertet. Eine Interessenssteigerung findet

sich im besonderen Maße für die Schüler mit geringen Ausgangswerten – auch der Lernzuwachs der Schüler mit geringen Ausgangswerten für Wissen und Anwendungszuversicht zeigt sich besonders effizient. Itzek-Greulich und Vollmer (2017) zeigen, dass sich Schülerlabore im besonderen Maße anbieten, um abstrakte Inhalte darzustellen und gerade lernschwache Schüler von diesen praktischen realitätsnahen Arbeiten profitieren. Pawek (2011) zeigt ebenfalls, dass die Beurteilung der Schülerlabormerkmale unabhängig von den anfänglichen Dispositionen (Interesse und Fähigkeitsselbstkonzept) ausfällt. In der Arbeit von Guderian (2007) zeigen die Schüler mit einem geringen individuellen Ausgangsinteresse dagegen eine niedrigere Bewertung der wertbezogenen und epistemischen Komponente des aktuellen Interesses. Allerdings erhebt Guderian ein inhaltspezifisches Ausgangsinteresse, während die vorliegende Arbeit ein generelles „Ausgangsinteresse für Biologie und Forschung“ adressiert und es als unabhängige Variable definiert. Eine entsprechende Untersuchung im Rahmen der Daten der vorliegenden Arbeit kann die Möglichkeit bieten, diesen Einfluss ebenfalls zu überprüfen. Diesbezüglich kann das Item des Prä-Interesses der retrospektiven Prä-Post-Erhebung genutzt werden, um die Abhängigkeit der Qualitätsbewertung der SLT von einem inhaltspezifischen Interesse zu betrachten. Durch diese Untersuchung könnte der Befund verifiziert oder neu bewertet werden, dass die Konzepte der SLT auch von den nicht interessierten Schülern positiv bewertet werden.

13.1.1 Lernklima und Lernzuwachs

Die Qualität der Interaktionen im Klassenzimmer kann als „Unterrichtsklima“ bezeichnet werden. Dazu zählt u. a. das Lernklima im Sinne sozialer Erwartungskontexte, wie Zuwendung, Empathie, Ermutigung, Respekt, Engagement und Leistungserwartung (Steffens und Höfer 2014). Diese Aspekte finden sich in den Komponenten „Lerndienliche Atmosphäre“ und „Motivierende Atmosphäre“ wieder. Die Hattie-Studie zeigt, dass das Lernklima den Lernerfolg wirksam beeinflusst, mit Effektstärken von $d = 0,43-0,72$ (Steffens und Höfer 2014). Die hohe Bewertung dieser beiden Komponenten ist demnach von besonderer Bedeutung und kann den höchst signifikanten retrospektiven Anstieg für alle drei SLT der Items „Wissen“ und „Anwendungszuversicht“ in der retrospektiven Erhebung miterklären. Weiterhin kann die signifikant höhere Bewertung der „Lerndienlichen Atmosphäre“ für den SLT „Verhalten“ ($*r_{\text{Elektrophysiologie}} = 0,21$; $*r_{\text{Summenpotenzial}} = 0,17$) entsprechend des besonders großen Anstiegs der beiden Items für den SLT „Verhalten“ miterklären. Bezüglich der Kursformunterschiede zeigen die Grundkursschüler für die „Lerndienliche Atmosphäre“ ($*r_{\text{Elektrophysiologie}} = 0,24$; $***r_{\text{Gesamt}} = 0,17$) und die „Motivierende Atmosphäre“ ($***r_{\text{Elektrophysiologie}} = 0,25$; $*r_{\text{Summenpotenzial}} = 0,19$; $***r_{\text{Gesamt}} = 0,20$) sowie für die „Wissensvermittlung“ ($*r_{\text{Gesamt}} = 0,11$) signifikant höhere Bewertungen als die Leistungskursschüler. Ausgehend

von dem beschriebenen niedrigeren „Ausgangsinteresse“ der Grundkurschüler können diese Bewertungen aus einer niedrigeren Erwartungshaltung heraus generiert sein, sodass die Grundkurschüler die SLT ausgehend von ihrem zugrunde liegenden Interesse an Biologie besonders positiv empfinden.

13.1.2 Einblick in wissenschaftliche Forschungsarbeit

Für die Feedback Komponente „Einblick in wissenschaftliche Forschungsarbeit“ zeigten sich die größte Varianz (Spannweiten: 3,5–4,0; 5-stufige LS) und die niedrigsten Mittelwerte. Es wäre anzustreben, diese große Varianz der Rückmeldungen der Schüler zu minimieren. Es muss davon ausgegangen werden, dass der gegebene Einblick am SLT „Verhalten“ (MW = $3,71 \pm 0,98$) und im Besonderen am SLT „Elektrophysiologie“ (MW = $3,66 \pm 0,86$) nicht ausreichend vermittelt wurde, da sich die Bewertungen nicht vom SLT „Summenpotenzial“ (MW = $3,63 \pm 0,90$) unterscheiden. Letzteres Konzept bietet jedoch weniger einen Einblick in wissenschaftliche Forschungsarbeit als vielmehr einen Forschungsbezug zum eigenen Körper. Durch die Schwerpunktsetzung vieler Schülerlabore auf die Vermittlung von authentischer Forschungsarbeit scheint es von Bedeutung zu sein, ein besonderes Augenmerk darauf zu legen, wie Schülern die Authentizität der angebotenen Experimente vermittelt werden kann. Im Konzept des SLT „Elektrophysiologie“ scheint dies noch nicht umfassend gelungen zu sein, da sich die Bewertung der Komponente nicht von den beiden anderen SLT abhebt. Dies entspricht der ausgeführten Bewertung der Lehrkräfte für den „Zugewinn an neuen Methoden für die Schüler“, der für den SLT „Elektrophysiologie“ überraschend gering ausfällt. Explizitere Studien zur Authentizitätswahrnehmung des EPhys-Setups sowie der Neurosimulation sollten umgesetzt werden. Wentorf et al. (2015) führen aus, dass die Vorstellungen über das konkrete Tätigkeitsfeld von Naturwissenschaftlern die Basis für eine Berufsorientierung darstellen. In ihrer Studie weisen die Autoren nach, dass die Schüler kein adäquates Bild von der Arbeit eines Naturwissenschaftlers besitzen. Dieses Bild muss dementsprechend korrigiert werden, um den Schülern eine angemessene Berufsorientierung ermöglichen zu können. Weiterhin kann das Ziel von außerschulischen Lernorten – authentische Forschung zu vermitteln – nur gelingen, wenn den Schülern der Zugang zu dieser bewusst ist. Unter anderen Autoren erhebt Glowinski (2007) die Wahrnehmung der Authentizität und zeigt auf, dass die interessierten Schüler diese höher bewerten. Dieser Trend ist in den Daten der vorliegenden Arbeit – wenn auch ohne Signifikanzen – für alle SLT ebenfalls festzustellen.

13.1.3 Lebenswelt der Schüler

Die Bewertungen für den SLT „Summenpotenzial“ seitens der Lehrkräfte fiel für einige Items etwas geringer aus als für die beiden anderen SLT. Eine Erklärung wurde darin gefunden, dass die Inhalte des SLT „Summenpotenzial“ nicht explizit im Hessischen Kerncurriculum gefordert sind (vgl. Hessisches Kultusministerium 2016). Die Schüler dagegen bewerten den SLT bezüglich seiner Qualität und im Besonderen hinsichtlich ihres Interesses an den Inhalten relativ hoch. Viele Schülerlabore versuchen, dem sinkenden Interesse u. a. mit einer Verbindung der Inhalte zur Lebenswelt der Schüler zu begegnen. Dieser Bezug ist insofern erstrebenswert, als neu zu erwerbendes Wissen auf vorangegangene Alltagserfahrungen – also Vorwissen – aufbaut. Ohne diesen Zusammenhang wird es auch als „träges Wissen“ bezeichnet (Gerstenmaier und Mandl 1995). Für Schüler ist der Bezug zu ihrer Lebenswirklichkeit bedeutsam und Interesse fördernd (Killermann et al. 2009).

13.2 Retrospektive

Hattie (2009) zeigt in seiner Metaanalyse, dass die Selbsteinschätzung des Leistungsniveaus durch die Lernenden als Faktor mit der größten Effektstärke mit dem schulischen Lernerfolg zusammenhängt. Es ist demnach davon auszugehen, dass die Schüler relativ gut einschätzen können, wo ihr Leistungsniveau liegt (vgl. Meraner 2014). Eine selbsteingeschätzte Erhebung des Lernzuwachses ist demnach von besonderer Bedeutung, um die Qualität der Konzepte der SLT zu bewerten und zu eruieren, ob ein Zuwachs erwirkt werden konnte. Scharfenberg (2005) zeigt für ein Biologielabor anhand eines Wissenstests, dass der Lernerfolg der Experimental-Gruppe im Vergleich zu einer Kontrollgruppe, die ohne Experimente in der Schule unterrichtet wird, signifikant höher ist. Die retrospektive Prä-Post-Erhebung der vorliegenden Arbeit zeigt eine höchst signifikante Steigerung der Items „Wissen“, „Anwendungszuversicht“ und „Interesse am Thema“ (vgl. Kapitel 8.2). Alle SLT fördern entsprechend – neben der gut bewerteten Qualität der Konzepte – auch den Lernzuwachs und das Interesse. Die Bewertung des Prä-Interesses fällt für die jeweiligen SLT am höchsten aus. Jedoch zeigt der SLT „Verhalten“ hier signifikant niedrigere Werte als die beiden anderen SLT ($***r_{\text{Elektrophysiologie}} = 0,28$; $***r_{\text{Summenpotenzial}} = 0,36$). Trotz des besonders großen Anstiegs im Vergleich zum Post-Interesse ($\Delta = 0,77$; $***r = 0,57$; 5-stufige LS) bleibt der Wert niedriger als das Post-Interesse der anderen beiden SLT. Die Werte entsprechen den Ergebnissen die Dierkes und Lehmann (2019, S. 2) darstellen. Die Autoren zeigen, wie sich das Interesse von Schülern an verschiedenen Themen im Biologieunterricht abhängig von der Jahrgangsstufe verändert. Die Themen „Tiere in meiner Umgebung“ und „Zellen, Lebewesen und Ökosysteme“ werden hin zur Oberstufe als weniger interessant eingestuft. Die Themen „Der menschliche Körper und seine Funktionen“, „Wie das Gehirn über Dinge nachdenkt

und Lösungen findet“ sowie „Wie unser Gehirn funktioniert“ weisen dagegen Werte im Bereich interessiert bis sehr interessiert auf. Der Unterschied im Anstieg des Interesses zwischen den SLT kann jedoch in der Analyse des Einzelitems „*Der heutige Tag hat mein Interesse positiv verändert*“ nicht bestätigt werden. Auch das Prä-Wissen fällt für den SLT „Verhalten“ kleiner aus als für die beiden anderen SLT ($***r_{\text{Summenpotenzial}} = 0,29$; $***r_{\text{Elektrophysiologie}} = 0,25$). Durch den großen Anstieg vom Prä- zum Post-Wissen am SLT „Verhalten“ ($\Delta = 1,67$; $***r = 0,81$) finden sich in den Post-Werten keine Unterschiede mehr. Dies kann u. a. mit der höheren Bewertung der Feedback Komponente „Wissensvermittlung“ für den SLT in Verbindung gebracht werden. Der niedrigere Ausgangswert zum Wissen wird zum einen durch den anzunehmenden neuen Zugang der Schüler zu Verhaltensstudien begründet sein, zum anderen durch die konkreten Inhalte zu Zweifleckgrillen. Glowinski (2007) zeigt in ihrer Arbeit über einen ebenfalls selbsteingeschätzten Wissenszuwachs, dass der Interessenszuwachs und die Wissensgenese nicht deutlich zusammenhängen. Eine Analyse dieses Zusammenhangs sollte für die Daten der vorliegenden Arbeit entsprechend angestrebt werden. Weiterhin fragt Glowinski den selbsteingeschätzten Wissenszuwachs zu verschiedenen Aspekten des SLT inhaltspezifisch ab. Diese differenzierte Betrachtung sollte in künftigen Studien adaptiert werden, um ein genaueres Bild darüber zu erhalten, welche Inhalte der SLT explizit zu einem Wissenszuwachs führen. So kann die Qualität der Inhaltsvermittlung genauer überprüft und können eventuelle Defizite im Wissen zu einzelnen Inhalten genauer identifiziert werden. Die Anwendungszuversicht wird für die SLT „Summenpotenzial“ und „Elektrophysiologie“ sowohl prä als auch post am geringsten von den drei Items eingeschätzt. Dies lässt erneut darauf schließen, dass die elektrophysiologischen Inhalte den Schülern besondere Verständnisprobleme bereiten. Dem gegenüberzustellen ist, dass die Schüler dennoch ein sehr hohes Interesse an dem Thema rückmelden.

Ein signifikanter Anstieg der Schüler mit hohen Ausgangswerten der Prä-Items findet sich nur für das Wissen am SLT „Summenpotenzial“. Allerdings muss beachtet werden, dass die Skala der Items so konzipiert ist, dass die Schüler keine Möglichkeit haben, eine (große) Steigerung der drei Items anzugeben, wenn sie bereits in ihren Prä-Einschätzungen hohe Werte aufweisen (4 oder 5; 5-stufige LS). Ein Blick auf das Einzelitem „*Der heutige Tag hat mein Interesse positiv verändert*“ in Abhängigkeit von der Komponente „Ausgangsinteresse an Biologie & Forschung“ zeigt, dass die sehr interessierten Schüler für den SLT „Elektrophysiologie“ und „Summenpotenzial“ ihre Interessensänderung signifikant höher bewerten als die interessierten ($***r = 0,34-0,35$) und nicht interessierten Schüler ($**r = 0,25-0,34$). Die Einschränkung der retrospektiven Erhebung kann durch diese Betrachtung zumindest für das Interesse differenzierter bewertet werden. Demnach muss ein großer Interessensanstieg durch den Besuch des Schülerlabors für alle drei Gruppierungen der retrospektiven

Bewertungen angenommen werden. Zu einem ähnlichen Ergebnis kam Glowinski (2007), in deren Studie die interessierten Schüler auch den größten Interessenszuwachs aufweisen.

13.2.1 Gruppenspezifische Unterschiede

Holstermann (2009) zeigt in ihrer Studie für Schüler der 10. Klasse, dass Mädchen insgesamt ein höheres Interesse am Schulfach Biologie aufweisen. Ausgehend von dem in der vorliegenden Studie erhobenen „Ausgangsinteresse an Biologie & Forschung“ konnte dieser Geschlechterunterschied nicht bestätigt werden, was vornehmlich durch den hohen Anteil der Leistungskurschüler begründet sein mag. Es wäre zu erwarten gewesen, dass die von Holstermann aufgezeigten Präferenzen der Jungen bezüglich Physik und Technik in den Bewertungen zum SLT „Elektrophysiologie“ zu finden sind – allerdings fiel das Prä-Interesse zugunsten der weiblichen Schüler aus ($*r = 0,12$). Im selben Maße überraschend ist das von den männlichen Schülern höher angegebene Prä-Wissen ($***r = 0,48$) und die angegebene Prä-Anwendungszuversicht ($*r = 0,39$) für den SLT „Verhalten“ – Holstermann (2009) fand ein höheres Interesse der Mädchen für Naturthemen und ein gleich großes Interesse für das Verhalten von Tieren. In den Post-Werten finden sich die Unterschiede nicht mehr. Die weiblichen Schüler bewerten ihren Lernzuwachs demnach entsprechend höher, was sich in der höheren Bewertung der „Wissensvermittlung“ am SLT „Verhalten“ von Seiten der weiblichen Schüler ($*r = 0,31$) widerspiegelt.

14 Bewertung der Hypothesen

Die formulierten Hypothesen zum Feedback der Schüler können demnach wie folgt bewertet werden:

- Die Hypothese 1a *„Die SLT werden von den Schülern hinsichtlich ihrer Qualität positiv bewertet“* wurde bestätigt.
- Die Hypothese 1b *„Bei dieser Bewertung spielen inhaltliche Komponenten des jeweiligen SLT eine Rolle“* konnte nur teilweise bestätigt werden.

Jedoch konnte gezeigt werden, dass die Verständnisprobleme für Themen der Elektrophysiologie an einzelnen Stellen eine Rolle spielen.

- Die Hypothese 2 *„Das zugrunde liegende Interesse an Biologie und Forschung spielt in der Bewertung der SLT hinsichtlich ihrer Qualität keine signifikante Rolle“* konnte weitestgehend bestätigt werden.

Die zwei aufgetretenen Unterschiede lassen sich mit dem Verständnsvorteil der sehr interessierten Schüler erklären. Eine Analyse des inhaltspezifischen Interesses sollte zur Verifizierung durchgeführt werden.

- Die Hypothese 3a *„Die SLT sind bei den Schülern mit einem selbsteingeschätzten Lernzuwachs verbunden“* konnte umfassend bestätigt werden.

Die Steigerung des Lernzuwachses ist für alle drei SLT hoch signifikant. Schüler mit niedrigem Ausgangswert zeigen einen besonders hohen Zuwachs vom Prä- zum Post-Wert. Für das Interesse konnte aufgezeigt werden, dass auch bei den Schülern mit hohem „Ausgangsinteresse“ eine große Interessenssteigerung angenommen werden muss.

- Die Hypothese 3b *„Bei der Einschätzung spielen inhaltliche Komponenten des jeweiligen SLT eine Rolle“* konnte nur teilweise bestätigt werden.

Das Interesse am SLT „Verhalten“ liegt tendenziell etwas unter den beiden anderen SLT. Die Anwendungszuversicht fällt für die SLT „Elektrophysiologie“ und „Summenpotenzial“ am geringsten aus und zeigt die thematischen Verständnisschwierigkeiten der Schüler.

15 Simulationsumsetzungen

Dem Experimentieren wird eine zentrale Bedeutung im Rahmen naturwissenschaftlicher Bildung zugeschrieben. Allerdings schneidet Unterricht ohne eigenständiges Experimentieren im Hinblick auf schulische Leistungen nicht generell schlechter ab. Dies wird u. a. mit den „rezeptartigen“ Vorgehensweisen erklärt und damit, dass die Schüler häufig dem Prozess des Experiments nicht folgen können (Hofstein und Lunetta 2004). Engeln und Euler (2004) führen aus, dass das Experimentieren allein keine Garantie für Motivation und Lernerfolg ist, vielmehr sollte das Experiment in ein tragfähiges Konzept eingebunden sein. Innerhalb der vorliegenden Arbeit lag der Fokus fachdidaktischer Forschung auf der Betrachtung des experimentellen Zugangs zur Elektrophysiologie über das entwickelte EPhys-Setup und die entsprechende Neurosimulation, welche am SLT „Elektrophysiologie“ zum Einsatz kommen. In der Literatur werden weitreichende Verständnisprobleme bezüglich der Elektrophysiologie beschrieben und entsprechend wurden bereits vielfältige Vermittlungsansätze erprobt (vgl. Kapitel 2.1–2.3). Allerdings wurden diese Ansätze vornehmlich für den Bereich der Hochschullehre entwickelt, sodass ein Vermittlungsansatz und dessen Wirksamkeit für Schüler einen besonderen Forschungsbedarf aufweist. Eine Möglichkeit zur Verbesserung besteht darin, den Schülern eigene, experimentelle Zugänge anzubieten. Derartige Umsetzungen zur Entstehung und Messung von elektrischen Potenzialen haben gezeigt, dass sie Verständnisproblemen entgegenwirken können (u. a. Marzullo und Gage 2012; Shannon et al. 2014). Allerdings gestaltet sich die Umsetzung von forschungsnahen, authentischen Experimenten für die Elektrophysiologie aufgrund limitierter Ressourcen (z. B. Raum, Zeit, Geld) (u. a. Chinn und Malhotra 2002; Hofstein und Lunetta 2004; Marzullo und Gage 2012) auch im Umfeld eines Schülerlabors schwierig. Neben den ethischen Bedenken, die der Einsatz von Versuchstieren bei Lernenden auslösen kann (u. a. Dagda et al. 2013; Lewis 2014), besteht ein Mangel an einfachen, überzeugenden und kostengünstigen Werkzeugen. Weiterhin ist für das eigenständige Experimentieren eine adäquate Ausstattung mit mehreren Setups notwendig. Mar Quiroga und Price (2016) beschreiben in ihrer Studie, dass die Neuropräparation, die für die Durchführung von elektrophysiologischen Aufzeichnungen erforderlich ist, sehr komplex ist und die Erfassung von zuverlässigen, brauchbaren Daten viele Stunden dauern kann. Auch Schwab et al. (1995) diskutieren, dass sie zwar gute Erfahrungen mit der praktischen Umsetzung der elektrophysiologischen Messungen gemacht haben, dass die Studierenden aber einige Stunden Training vor dem Kurs und weiterhin auch bei der Durchführung Hilfe benötigten, bis ein erfolgreicher Einstich einer Oocyte erreicht werden konnte. In der Praxis ist es nicht möglich, mit einem Elektrophysiologie-Setup – wenn überhaupt verfügbar – alle Schüler aktiv in einen Prozess des tatsächlichen Forschungsexperiments einzubinden und dies weiterhin in einem schulisch adäquaten Zeitfenster zu ermöglichen. Eine alternative Möglichkeit der Vermittlung bieten computerbasierte Ansätze

(Lewis 2014), auf deren Grundlage die schülergerechte, computerbasierte Neurosimulation (vgl. Hayes et al. 2003) des EPhys-Setups entwickelt wurde. Computergestützte Experimente können Eigenschaften von authentischer Forschung aufweisen (Chinn und Malhotra 2002). Estriegana et al. (2019) beschreiben, dass die Entwicklung von Technologien die vielfältige Entwicklung von E-Learning Szenarien, virtuellen Lernumgebungen oder Simulationen erleichtert. Dennoch ist es nicht in allen Feldern einfach, eine adäquate digitale Umgebung zu designen, die Hands-on Erfahrungen und Praxis gleichwertig ersetzen kann. Lewis (2014) fasst zusammen, dass Simulationen keine Laborpraxis ersetzen sollten, die eigentlich auch real durchgeführt werden könnte. Die Neurosimulation bzw. das EPhys-Setup dürfen jedoch nicht als Ersatz des eigentlichen Forschungsexperiments betrachtet werden, sondern stellen im Kontext der Schülerbildung vielmehr eine einzigartige Zugangsmöglichkeit dar, die den Schülern sonst nicht geboten werden könnte.

Estriegana et al. (2019) erklären, dass innovative Lerntechnologien Möglichkeiten bieten, das Verständnis von Lernenden zu verbessern, Gelegenheit zur Diskussion zu schaffen, Kompetenzen der Lernenden anhand praktischer Erfahrungen zu entwickeln und die Lernergebnisse zu verbessern. Diese Erwartungen sind jedoch nur zutreffend, wenn die Lernenden daran interessiert sind, die Technologien zu benutzen. Das beste Tool schlägt fehl, wenn es nicht das Interesse der Lernenden weckt oder diese nicht motiviert sind, es zu verwenden. Daher ist es erforderlich, die potenzielle Akzeptanz oder Ablehnung der Schüler zu verstehen und die beeinflussenden Faktoren zu bestimmen. Dem wurde mit verschiedenen Testinstrumenten in der vorliegenden Arbeit nachgegangen. Neben der Simulationsbewertung fand eine Wirksamkeitsanalyse durch die Erhebung der Motivation der Schüler statt (LMS). Weiterhin von Interesse ist, inwiefern gegenüber den Simulationsumsetzungen eine Technologieakzeptanz vorliegt (TAM), die für den Schulkontext ausgehend von der steigenden Einbindung von Technologien einen entsprechenden Forschungsbedarf aufweist. Auch bezüglich Neurosimulationen finden sich die Konzeptionen und die damit verbundene Forschung vornehmlich im Bereich der Hochschullehre.

Mar Quiroga und Price (2016) erklären, dass eine bloße Bereitstellung von Daten für eine Analyse, ohne den experimentellen Kontext zu vermitteln, vom Standpunkt des Lehrens und Lernens aus unangebracht sei. Dies kann in Ansätzen kompensiert werden, wenn die virtuelle Umsetzung auch den Umgang mit Laborgeräten und -methoden vermittelt (u. a. Barry 1994; Braun 2003; Griffin 2003, vgl. Kapitel 2.3.1). Für das entwickelte EPhys-Setup wurde der Zugang zur Praxis mit der möglichst authentischen Forschungsumgebung des Setups erlangt, sodass Hands-on Komponenten vorliegen (vgl. Kapitel 5.3.1). Der Einfluss dieser Komponenten auf die Bewertung der Testinstrumente war von besonderem Interesse. Die konzipierte Umsetzung des EPhys-Setups (Setup-Gruppe) wurde daher

mit der Neurosimulation ohne Hands-on Komponenten verglichen (PC-Gruppe, vgl. Kapitel 5.3.6). Außerdem wurde eine Abhängigkeit vom zugrunde liegenden Biologieinteresse sowie den „Computerfähigkeiten“ vergleichend betrachtet.

15.1 Neurosimulation und EPhys-Setup

35 % der Schüler der PC-Gruppe gaben an, sie hätten lieber das EPhys-Setup verwendet. Jedoch muss die niedrig ausfallende Angabe zurückhaltend bewertet werden, da die Schüler eine große Akzeptanz gegenüber der durchgeführten Studie und der damit verbundenen Einteilung in zwei Untersuchungsgruppen aufwiesen. Entsprechend fiel die Benotung für die Setup-Umsetzung signifikant besser aus als für die reine PC-Umsetzung ($*r = 0,15$). Bezüglich der Einzelitems der Simulationsbewertung finden sich zwei unterschiedliche Bewertungen zugunsten der Setup-Gruppe: A) *„Die Simulation gab mir einen Eindruck von einem realen Elektrophysiologie-Setup“* ($***r = 0,24$); B) *„Die Simulation der elektrophysiologischen Messungen ist eine gute Erfahrung“* ($*r = 0,15$). Item A zeigt, dass die Setup-Gruppe die Authentizität der Umsetzung wahrnimmt (MW = $3,22 \pm 0,74$; 4-stufige LS) und dementsprechend auch die gemachte Erfahrung höher einschätzt (MW = $3,51 \pm 0,58$). Die Bewertung der Simulationsumsetzungen auf Grundlage der gebildeten Komponenten „Enjoyment & Approval“ (EA) und „Understanding“ (US) weisen hohe Mittelwerte auf. US wurde von beiden Untersuchungsgruppen äquivalent bewertet, sodass sowohl die Neurosimulation als auch die Hands-on Elemente des Setups für die Schüler in ihrer Anwendung verständlich waren und als unterstützend für das „inhaltliche Verständnis“ wahrgenommen wurden. Die Bewertung von EA fällt für die Setup-Gruppe höher aus ($***r = 0,17$). Die Schüler am EPhys-Setup haben demnach eine positivere Einstellung gegenüber der Umsetzung.

15.1.1 Motivationsgenerierung

Die Motivation gilt als eine der Grundlagen für die Bereitschaft des Lernens (Krapp 2003; Pintrich 2003). *„Damit Schüler/innen eine erwünschte Lernhaltung einnehmen und kognitive Prozesse überhaupt stattfinden, müssen sie motiviert sein und ihre Aufmerksamkeit auf das Lernangebot richten“* (Killermann et al. 2009, S. 64). Nach der Person-Gegenstands-Theorie ist die Qualität der intrinsischen Motivation einer der Hauptgründe dafür, eine interessenbezogene Handlung auszuführen (Krapp 2007). Das emotionale Erleben wirkt sich also auf das Interesse aus (Bergin 1999). Die Motivation spielt dementsprechend eine wichtige Rolle, um den Defiziten in den neurobiologischen Kenntnissen und Fähigkeiten von Lernenden zu begegnen. Itzek-Greulich und Schwarzer (2016) beschreiben für die Ergebnisse der WiSS-Studie, dass handlungsorientierter Unterricht sowohl in der Schule

als auch im Schülerlabor die Motivation weckt, der Effekt im Schülerlabor jedoch nachhaltiger ist. Corter et al. (2011) zeigen in einer vergleichenden Studie von Hands-on Laboren, Remote-Laboren und Simulationen, dass die Arbeit mit realen Daten die Motivation besonders fördert. Dies ist in der konzipierten Neurosimulation gegeben (vgl. Kapitel 5.3.7). Anhand der LMS wurde nachgewiesen, dass die Arbeit mit dem EPhys-Setup sowie mit der Neurosimulation Motivation generiert (vgl. Kapitel 9.2). Das EPhys-Setup erfüllt viele der Authentizitätsmerkmale des Modells von Betz (2018) (vgl. Kapitel 5.3.7 und **Abbildung 3**, Kapitel 1.2). Nach diesem Modell entsteht zusammen mit individuellen Personenmerkmalen eine Authentizitätswahrnehmung, die motivationale Effekte hervorrufen kann. Die Komponenten „Effort“ und „Interest“ wurden von den Schülern sehr hoch eingeschätzt. Es wird davon ausgegangen, dass sich praktische Tätigkeiten positiv auf die Interessensentwicklung auswirken (Bergin 1999). Abhängig von der verwendeten Simulationsumsetzung zeigt sich für die Komponente des „situationalen Interesses“ (INT) ein signifikanter Unterschied, wobei die Setup-Gruppe die Komponente höher bewertet als die PC-Gruppe ($*r = 0,16$). Die Schüler der Setup-Gruppe empfinden mehr „Freude“ beim Arbeiten mit der Umsetzung, was einer intrinsischen Motivation entspricht. Das „situationale Interesse“ wird demnach von der Hands-on Praxis stärker gefördert als von der Simulationspraxis. Ähnliche Befunde sind in den Arbeiten von Engeln (2004), Głowinski (2007) und Pawek (2009) beschrieben, die eine positive Auswirkung der Authentizität bzw. des authentischen Einblicks in die Forschung auf das „aktuelle Interesse“ nachweisen. Die höhere Bewertung von INT kann daher durch eine größere Authentizitätswahrnehmung erklärt werden. Dies zeigte sich bereits in der höheren Einschätzung des Items „Die Simulation gab mir einen Eindruck von einem realen Elektrophysiologie-Setup“ durch die Setup-Gruppe. Die Komponente „Self-efficacy“ im Sinne des Lernerfolgs weist eine größere Varianz auf. Eine höhere Bewertung der Komponente wäre wünschenswert gewesen, jedoch kann eine hervorgerufene anhaltende Motivation zu einer Aufrechterhaltung von Lernaktivitäten führen, die Kenntnisse und Fähigkeiten bezüglich der Inhalte auf Dauer steigern kann (vgl. Krapp 2003; Pintrich 2003). Studien belegen, dass sowohl intrinsische als auch extrinsische Anreize die Lernhandlung positiv beeinflussen können (Killermann et al. 2009). Die hohe Varianz von SE_LE und die damit verbundene Abhängigkeit vom Biologieinteresse und den „Computerfähigkeiten“ werden im späteren Verlauf der Arbeit diskutiert.

Der Unterschied der Simulationsumsetzungen für die LMS fällt geringer aus als erwartet, die Hands-on Komponenten scheinen demnach nur eine untergeordnete Rolle für die Motivation zu spielen und auch die reine Neurosimulation wirkt motivierend auf die Schüler – die niedrigere Einschätzung von INT liegt dennoch im positiven Bewertungsbereich (Mdn = 3,00; IQR = 0,85; 4-stufige LS). Holstermann et al. (2010) zeigen für mehrere Hands-on Aktivitäten, dass diese zwar häufig das Interesse fördern, jedoch für einzelne Hands-on Aktivitäten kein fördernder Einfluss nachgewiesen werden konnte.

15.1.2 Technologieakzeptanz

Durch die wachsende Abhängigkeit von computergestützten Systemen und die zunehmende Geschwindigkeit bezüglich der Einführung neuer Technologien hat die Benutzerakzeptanz von Technologien auch heute noch Relevanz. Das TAM dominiert diesbezüglich auch die Forschung im Bildungskontext (Granić und Marangunić 2019), wie z. B. im E-Learning Bereich (Šumak et al. 2011). Die Technologieakzeptanz im Schulkontext weist ausgehend von der steigenden Einbindung von Technologien einen entsprechenden Forschungsbedarf auf – im Review von Granić und Marangunić (2019) zeigen jedoch nur 4 % der Studien im Bildungskontext eine Untersuchung der Technologieakzeptanz bei Schülern. Akzeptanz ist wichtig für die motivationale und handlungsorientierte Komponente, die wiederum Einfluss darauf haben, wie intensiv sich der Schüler mit dem EPhys-Setup und seinen Inhalten beschäftigen wird (vgl. Müller-Böling und Müller 1986). Viele Studien zu Neurosimulationen können eine Akzeptanz der Lernenden gegenüber den computerbasierten Experimenten nachweisen (u. a. Braun 2003; Demir 2006; Newman und Newman 2013; vgl. Kapitel 2.3.1) Diwakar et al. (2014) weisen die Akzeptanz gegenüber den „Amrita Virtual Labs“ mit Komponenten des TAM nach (PU, PEOU und Relative Advantage). Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass die Schüler dem EPhys-Setup bzw. der Neurosimulation gegenüber eine große Akzeptanz aufweisen (vgl. Kapitel 9.3). Die „wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“ wird hierbei besonders hoch bewertet. Die „wahrgenommene Nützlichkeit“, die sich in diesem Kontext auf einen gesteigerten Lernerfolg bezieht, weist große IQR auf. Die große Varianz entspricht der Beurteilung der „Selbstwirksamkeit im Sinne des Lernerfolgs“ der LMS. Daher wird auch für PU eine differenzierte Betrachtung bezüglich Abhängigkeiten vom Biologieinteresse und den „Computerfähigkeiten“ im späteren Verlauf betrachtet. In Anlehnung an die Selbstbestimmungstheorie, sollten die Hands-on Komponenten durch gesteigertes Interesse sowie durch ein Gefühl der Kompetenz eine gesteigerte Motivation hervorrufen, die auch zu einer erhöhten Akzeptanz führt. Die „wahrgenommene Freude“ fällt für die Setup-Gruppe höher aus als für die PC-Gruppe (** $r = 0,21$). Die Bewertung dieser intrinsischen Komponente entspricht dem signifikanten Unterschied der intrinsischen Komponente „Interest“ der LMS. Auch die mittlere Einschätzung der PC-Gruppe von PE liegt im positiven Bewertungsbereich (Mdn = 3,40; IQR = 1,20; 5-stufige LS), weist jedoch einen großen IQR auf. PEOU und PU zeigen hinsichtlich der verwendeten Simulationsumsetzung keinen Unterschied. Die meisten Arbeiten deuten darauf hin, dass PU relevanter für die „Nutzungsabsicht“ ist als PEOU (u. a. Venkatesh und Davis 2000). Granić und Marangunić (2019) weisen diesen Zusammenhang für den Bildungskontext und Šumak et al. (2011) für den E-Learning Kontext nach. Für die Simulationsumsetzung fiel die Bewertung der PEOU über alle Gruppen hinweg höher aus als die Bewertung der PU. Dennoch sprechen die hohen Werte der drei Komponenten für eine vorliegende Technologieakzeptanz, die eine „Nutzungsabsicht“ im Rahmen der

erklärenden Varianzen bewirken kann. In der Arbeit von Davis et al. (1992) erklären PE und PU beispielsweise 62–75 % der Varianz der „Nutzungsabsicht“. PEOU und PU zeigen einen nachweislichen Einfluss auf die Akzeptanz für das Lernen mit Technologien (Granić und Marangunić 2019).

15.1.3 Einfluss der verwendeten Simulation

Die Abhängigkeiten, die für die verwendete Simulationsumsetzung gefunden wurden, beziehen sich ausschließlich auf Komponenten der „Freude“ und damit auf den intrinsischen Bereich. Die Effektstärken liegen alle im moderaten Bereich (EA: $**r = 0,17$, INT: $*r = 0,16$; PE: $**r = 0,21$). Die Komponente „Enjoyment & Approval“ wird gebildet aus Fragen zur Wahrnehmung der Simulationsumsetzung, zur Empfehlung des SLT und zur Einschätzung nach der Realitätsnähe (Beispielitem: *„Die Simulation der elektrophysiologischen Messungen ist eine gute Erfahrung“*). Die Komponenten „Interest“ und „Perceived Enjoyment“ erheben Fragen zur Freude beim Arbeiten mit der Simulationsumsetzung (Beispielitem INT: *„Das Arbeiten mit dem Setup hat mir sehr viel Freude bereitet“*; Beispielitem PE: *„Die praktische Nutzung des virtuellen Setups war ansprechend“*).

15.1.4 Einfluss auf die Feedback-Bewertungen

Rückblickend wurde überprüft, ob die verwendete Simulationsumsetzung einen Einfluss auf die Feedback-Bewertungen hat (vgl. Kapitel 9.4). Die Hands-on Komponenten der Setup-Gruppe hatten neben dem Anspruch einer expliziten Praxiserfahrung auch den Ansatz, die Umsetzung für die Schüler noch authentischer zu gestalten als dies mit einer reinen Computersimulation möglich ist. Ein signifikanter Einfluss der Untersuchungsgruppe auf die Feedback Komponente „Einblick in wissenschaftliche Forschungsarbeit“ konnte zu Gunsten der Setup-Gruppe nachgewiesen werden ($***r = 0,25$). Das wichtige Ziel der naturwissenschaftlichen Bildung, Schülern ein authentisches Bild von Forschung zu vermitteln, ist demnach abhängig von der Simulationsumsetzung – der oben diskutierte kritische Erfolg diesbezüglich muss also differenzierter betrachtet werden. Weiterhin wurde überprüft, ob die verwendete Simulationsumsetzung einen Einfluss auf die Einschätzungen der retrospektiven Erhebung aufweist – es wurde ein signifikanter Unterschied bezüglich des Post-Interesses gefunden – die Setup-Schüler bewerteten das Item höher als die PC-Schüler ($*r = 0,16$). Die Items des Lernzuwachses (Wissen und Anwendungszuversicht) unterscheiden sich nicht. Der Unterschied im Post-Interesse entspricht dem Befund, dass sich die Komponente des „situationalen Interesses“ der LMS abhängig von der Simulationsumsetzung unterscheidet. Es wurde gezeigt, dass die verwendete Simulationsumsetzung ausschließlich einen Einfluss auf die Komponenten der

„Freude“ zeigt. Bergin (1999) beschreibt, dass sich positive Emotionen wie Freude oder Euphorie vorteilhaft auf die Interessensentwicklung auswirken. Das gesteigerte Post-Interesse der Setup-Gruppe kann damit erklärt werden. Der unabhängige Effekt auf den Lernzuwachs entspricht den Ergebnissen anderer Studien. Bezüglich der Lerneffizienz werden häufig keine Unterschiede zwischen den Laborformen in der Lehre der Naturwissenschaften gefunden, sodass die Ergebnisse der virtuellen Ansätze im Vergleich zu traditionellen Laboren gleich oder besser sind (u. a. Brinson 2015; Lewis 2014). Brinson (2015) weist in seiner Review-Analyse im Besonderen die Effektivität bezüglich Wissen und Verständnis nach. Aber auch u. a. die Förderung der Forschungsfähigkeit können einzelne Studien zeigen. Im speziellen Einsatz von Neurosimulationen hat sich eine Effektivität zur Vermittlung der neurophysiologischen Inhalte gezeigt (u. a. Grisham 2009; Jong et al. 2013; Stuart 2009). Die Hands-on Komponenten des EPhys-Setups weisen demnach keinen Einfluss auf eine selbsteingeschätzte Verbesserung der Kenntnisse zur Elektrophysiologie auf. Allerdings wurde bereits ausgeführt, dass ein gesteigertes Interesse als fördernd für den Lernerfolg betrachtet werden muss, da es zu einer intensiveren Auseinandersetzung mit dem Interessensinhalt führt (vgl. Killermann et al. 2009). Euler (2010) fasst zusammen, dass die Vermittlung von Methodenkenntnissen und von einem authentischen Bild der Biologie als experimenteller Naturwissenschaft Wissen und Interesse generieren kann. Dieses Ziel wurde über die authentische Vermittlung in beiden Umsetzungen erreicht. Schiepe-Tiska et al. (2016) diskutieren, dass Unterrichtsmuster, die von Hands-on Aktivitäten geprägt sind, zwar motivierend wirken, aber mit niedrigeren Lernergebnissen verbunden sind. Für die vorliegende Studie müsste der selbsteingeschätzte Lernzuwachs über einen Wissenstest verifiziert und mit einer weiteren Kontrollgruppe ohne praktischen Zugang verglichen werden.

15.2 Abhängigkeit vom Biologieinteresse und den Computerfähigkeiten

Ein interessantes Ergebnis der vorliegenden Studie ist der Befund, dass in der Gesamtbetrachtung ein hoher Einfluss des zugrunde liegenden Biologieinteresses sowie der „Computerfähigkeiten“ auf die Bewertungen der drei Testskalen vorliegt, der den Einfluss der verwendeten Simulationsumsetzung in vielen Fällen übertrifft. **Tabelle 26** fasst diese Ergebnisse zusammen.

Tabelle 26: Zusammenfassung der Abhängigkeiten der untersuchten Komponenten der drei Testinstrumente (Simulationsbewertung, LMS und TAM) von den unabhängigen Variablen verwendete Simulation, Biologieinteresse und „Computerfähigkeiten“.

Unabhängige Variable	SB		LMS			TAM		
	US	EA	SE_LE	INT	EFF	PE	PU	PEOU
Simulationsumsetzung	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗
Biologieinteresse	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Computerfähigkeiten	✓	✗	✓	(✓)	✓	✗	✓	(✓)

EA: Freude & Annahme; EFF: Bemühungen; INT: Interesse; LMS: Lab Motivation Scale; PE: wahrgenommene Freude; PEOU: wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit.; PU: wahrgenommene Nützlichkeit; SB: Simulationsbewertung; SE_LE: Selbstwirksamkeit im Sinne des Lernerfolgs; TAM: Technology Acceptance Model; US: Verständnis. ✓: Mindestens ein signifikanter Gruppenunterschied nachgewiesen; (✓): Kein Gruppenunterschied, aber ein positiver Jonckheere-Terpstra-Test nachgewiesen; ✗: keine signifikanten Abhängigkeiten gefunden.

15.2.1 Einfluss des Biologieinteresses

Das Modell der Authentizität von Betz (2018) zeigt, dass neben den Merkmalen des Lernsettings auch Personenmerkmale auf die Wahrnehmung der Authentizität Einfluss nehmen. Dazu zählen u. a. das Vorwissen, das individuelle Interesse oder auch das Geschlecht. Die Authentizitätswahrnehmung kann affektive und kognitive Effekte hervorrufen, wie beispielsweise Motivation, situationales Interesse oder Einstellungsänderungen. Das individuelle Biologieinteresse der Schüler zeigt einen Einfluss auf alle acht untersuchten Komponenten. Die größeren Effekte beziehen sich auf die Komponenten der „Lernwirksamkeit“ oder der „Freude“. Der Lernzuwachs der sehr interessierten Schüler konnte mit der konzipierten retrospektiven Erhebung nicht nachvollzogen werden. Eine differenzierte Betrachtung für das Item des Interesses zeigte bereits, dass die sehr interessierten Schüler auch eine sehr große positive Interessensänderung aufweisen. Für den SLT „Elektrophysiologie“ kann mit den Komponenten der „Lernwirksamkeit“ gezeigt werden, dass die sehr interessierten Schüler außerdem ihren Lernerfolg besonders hoch einschätzen. Die beschriebene große Varianz der SE_LE findet sich für die sehr interessierten Schüler nicht – sie zeigen eine höhere Bewertung der Komponente gegenüber den interessierten und den nicht interessierten Schülern. Dies zeigt sich auch in einer großen Effektstärke ($***r = 0,47$), die wiederum direkt mit der höheren Bewertung von SE_LE durch die Leistungskursschüler zusammenhängt ($*r = 0,14$), die 93 % innerhalb der Gruppe der sehr interessierten Schüler ausmachen. Die „wahrgenommene Nützlichkeit“, die einen Lernvorteil durch die Simulation erhebt, zeigt ebenfalls eine höhere Einschätzung mit steigendem Interesse ($**r = 0,22$). Auch die Komponente „Understanding“ deckt Items ab, die den Nutzen zum Verständnis der Inhalte erheben

(** $r = 0,19$; Beispielitem: „Die Simulation half mir beim Verständnis der Elektrophysiologie“). Glowinski (2007) zeigt für das selbsteingeschätzte, allgemeine Wissen zum Thema des Schülerlabors (Molekularbiologie), dass dies für die interessierten Schüler ebenfalls höher ausfällt. Hier kann erneut auf die oben ausgeführte Bedeutung des Interesses für das Lernen und die schulischen Leistungen hingewiesen werden, das daraus resultiert, dass Interesse zu einem tiefergehenden Lernen führt (vgl. Berck und Graf 2018). Während der Beschäftigung mit einem Interessensgegenstand werden positive Emotionen wie Freude erlebt (Schiefele und Krapp 1996). Demnach zeigt das Biologieinteresse einen Einfluss auf die Komponenten der „Freude“ (EA: *** $r = 0,34$; INT: *** $r = 0,24$; PE: ** $r = 0,21$), wobei die Effektstärken etwas größer ausfallen als bei den Unterschieden, die abhängig von der Simulationsumsetzung gezeigt wurden. Der motivationsfördernde Einfluss des Biologieinteresses kann zum Teil auch die Abhängigkeit der Komponenten zum „Verständnis der Durchführung“ und zur „wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit“ vom Interesse erklären (EFF: *** $r = 0,29$; PEOU: ** $r = 0,22$). Innerhalb der LMS zeigen die nicht interessierten Schüler den höchsten Wert in INT (Mdn = 3,20; IQR = 1,00; 4-stufige LS). Ein ähnlicher Effekt wurde bereits in der Feedback-Analyse nachgewiesen. Dort gaben die Grundkursschüler, die ein geringeres „Ausgangsinteresse“ aufweisen, für einige Komponenten eine höhere Bewertung als die Leistungskursschüler an. Das zugrunde liegende Interesse kann demnach vermutlich bei einer geringeren Erwartungshaltung auch zu einer positiveren Einschätzung der intrinsischen Komponente führen.

15.2.2 Einfluss der Computerfähigkeiten

Die „Computerfähigkeiten“ zeigen einen Einfluss auf Komponenten zur „Zuversicht bezüglich der Methoden und der Inhalte“. Abdullah und Ward (2016) zeigen in ihrer E-Learning Metaanalyse, dass die „Computerselbstwirksamkeit“ die Komponente der „wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit“ maßgeblich beeinflusst. Ein ansteigender Trend der Bewertung von PEOU mit zunehmenden „Computerfähigkeiten“ konnte auch in der vorliegenden Arbeit nachgewiesen werden (** $r = 0,19$). Damit verbunden ist der Einfluss auf die inhaltlich verwandte Komponente US (** $r = 0,19$). Eine ausgeprägtere Abhängigkeit liegt bei der Motivationskomponente EFF vor (*** $r = 0,24$), bei der sich eine höhere Bewertung der Schüler mit guten „Computerfähigkeiten“ im Vergleich zu denen mit mittleren und schlechten Fähigkeiten zeigt. Dohn et al. (2016) beschreiben, dass die Lernenden für eine Motivationsgenerierung eine persönliche Überzeugung davon benötigen, dass sie die Fähigkeiten besitzen, Erfolg zu haben. In ihrer Arbeit beziehen sie dies auf die Komponente SE_LE, jedoch lässt es sich auch auf die benötigten „Computerfähigkeiten“ übertragen – abhängig von guten „Computerfähigkeiten“ sind die „Bemühungen“ (EFF) anhaltender (vgl. auch Bandura 2001). Die Abhängigkeit von SE_LE (** $r = 0,25$) lässt sich damit begründen, dass die Komponente auch Items

zum Lernerfolg bezüglich der Methode erhebt (Beispielitem: „*Ich bin zuversichtlich, dass ich die Methoden der elektrophysiologischen Messungen jetzt erläutern könnte*“). Den Einfluss der „Computerfähigkeiten“ auf die „wahrgenommene Nützlichkeit“ können Abdullah und Ward (2016) ebenfalls nachweisen. In der vorliegenden Arbeit zeigt sich ein annähernd mittlerer Effekt ($***r = 0,24$). Die männlichen Schüler schätzten die Komponente PU höher ein als die weiblichen ($*r = 0,18$) und finden sich mit einem höheren Anteil in der Gruppe mit guten Fähigkeiten. Ein Einfluss des Geschlechts auf die höhere Bewertung der PU kann demnach nicht ausgeschlossen werden. Die höhere Einschätzung der männlichen Schüler bezüglich des Items „*Die Nutzung einer Simulation im Vergleich zur Arbeit mit Arbeitszetteln ist meiner Meinung nach die bessere Methode, um Inhalte zu erarbeiten*“ (Simulationsbewertung) im Vergleich zu den weiblichen Schülern ($**r = 0,19$) kann in Bezug zu den ebenfalls höher eingeschätzten „Computerfähigkeiten“ gesetzt werden ($***r = 0,32$).

16 Strukturgleichungsmodell

Für eine Analyse von Einflussvariablen auf die Kernkomponenten des TAM wurde ein SEM erstellt und berechnet (vgl. Kapitel 11). Berücksichtigt wurden die Komponenten EFF und SE_LE der LMS sowie PE und PC_SE des TAM. Eine Analyse der resultierenden „Nutzungsabsicht“ abhängig von PU und PEOU wurde in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Die Gütekriterien der Modellanalyse belegen, dass das Modell als plausibel gelten kann, wonach die Analyse von Einflussvariablen auf die Kernkomponenten schlüssig ist. Die Güte der TAM Komponenten konnte mit einer vorangegangenen PCA bereits bestätigt werden (vgl. Kapitel 9.3). Die internen Konsistenzen der Komponenten liegen über einem Cronbach α von 0,7 und damit im guten bis sehr guten Bereich. Das TAM eignete sich daher zur Bestimmung der Technologieakzeptanz bezüglich der Simulationsumsetzungen. Die in der vorliegenden Arbeit gebildeten Kernkomponenten von PU und PEOU entsprechen in ihren Items größtenteils auch den Items, die am häufigsten verwendet werden. Legris et al. (2003) analysierten für ihr Review die gängigsten Items. Die vier häufigsten Items für PU sind:

- 1) *“Using (application) increases my productivity;*
- 2) *using (application) increases my job performance;*
- 3) *using (application) enhances my effectiveness on the job; and*
- 4) *overall, I find the (application) useful in my job”* (Legris et al. 2003, S. 197).

Die Items 2–4 entsprechen drei von sieben Items der gebildeten Komponente PU. Item 1 kann auf den vorliegenden Kontext nicht angewendet werden.

Die vier gängigsten Items für PEOU sind:

- 1) *“Learning to operate (the application) is easy for me;*
- 2) *I find it easy to get the (application) to do what I want to do;*
- 3) *the (application) is rigid and inflexible to interact with; and*
- 4) *overall, I find the (application) easy to use”* (Legris et al. 2003, S. 197).

Die Items 1 und 4 finden sich in der gebildeten Komponente PEOU (6 Items) wieder. Die Items 2 und 3 entsprechen sinngemäß ebenfalls verwendeten Items. Drei Items der PE Komponente (5 Items) sind angelehnt u. a. an die Arbeiten von Davis et al. (1992) oder Venkatesh und Bala (2008). Die zwei „Relative Advantage“ Items von Diwakar et al. (2014), die in der PCA ebenfalls auf die PE luden, entsprechen inhaltlich motivierenden Items, sodass die Neuzuordnung plausibel ist.

Die vier untersuchten Einflussvariablen erklären im SEM 51 % der Varianz von PU und 44 % der Varianz von PEOU. Dies entspricht einer guten Erklärungsstärke der Komponenten – die Kernkomponenten der Technologieakzeptanz werden zu knapp 50 % erklärt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 sollte mindestens 0,1 (10 %) betragen (Falk und Miller 1992). Die berechneten Regressionsgewichte der Einflussvariablen auf die Kernkomponenten des TAM (PU und PEOU) sind in **Tabelle 27** zusammengefasst. PE, SE_LE sowie EFF zeigen einen Einfluss auf PU und/oder PEOU. Für PC_SE konnte im SEM kein Einfluss auf die Kernkomponenten nachgewiesen werden. Die Regressionsgewichte mit großer Effektstärke finden sich für PE und EFF.

Tabelle 27: Bewertung der vorgeschlagenen Einflussvariablen auf die Kernkomponenten PU und PEOU des TAM.

Einflussvariable	PU	PEOU
PE	✓✓✓	✓
PC_SE	✗	✗
SE_LE	✓	-
EFF	✗	✓✓✓

✓: kleine Effektstärke; ✓✓: mittlere Effektstärke; ✓✓✓: große Effektstärke; ✗: kein signifikanter Einfluss gefunden.

Verschiedene Arbeiten weisen einen Einfluss von PE auf PEOU nach (u. a. Venkatesh 2000; Venkatesh et al. 2002; Venkatesh und Bala 2008). Abdullah und Ward (2016) zeigen für den E-Learning Kontext, dass 73 % der Studien einen signifikanten Einfluss von „Enjoyment“ auf die Komponente PEOU mit einem durchschnittlichen Pfadkoeffizienten von $\beta = 0,260$ aufweisen. Weiterhin zeigen die Autoren einen signifikanten Effekt auf PU mit einem durchschnittlichen Pfadkoeffizienten von $\beta = 0,418$. Dieser Einfluss wurde auch in der vorliegenden Arbeit nachgewiesen, wobei ebenfalls die Effektstärke auf PU größer ist (PU: $***\beta = 0,51$; PEOU: $**\beta = 0,21$) (vgl. auch Yi und Hwang 2003).

„Effort“ gehört nach der Definition der LMS zur extrinsischen Motivation und bezieht sich darauf, wie viel Mühe die Schüler in die Arbeit mit der Simulationsumsetzung investieren müssen. Eine positive Bewertung der Komponente spricht für eine Arbeit mit der Umsetzung, die frei von Bemühung und Anstrengung ist. Die Definition steht demnach in direktem Bezug zur Definition von PEOU. Demzufolge zeigt EFF einen positiven Einfluss auf PEOU ($***\beta = 0,54$). Das vierte signifikante Regressionsgewicht zeigt einen Einfluss von SE_LE auf PU. Die „Self-efficacy“ bezieht sich in der vorliegenden Arbeit auf den selbsteingeschätzten inhaltlichen und methodischen Lernerfolg. Die angewandte Definition der Komponente PU steht ebenfalls in direktem Bezug zur Lerneffizienz: Der Grad, zu dem ein Schüler glaubt, dass die Verwendung der Simulationsumsetzung sein Lernvermögen steigert (vgl. Diwakar et al. 2014; Park 2009). Dieser Bezug zeigt im SEM einen Einfluss des „Lernerfolgs“ auf die „wahrgenommene Nützlichkeit“ ($**\beta = 0,20$). Agudo-Peregrina et al. (2014) beschreiben dazu, dass es eine Grundbedingung für eine nützliche Bewertung eines Systems ist, dass die Lernbedürfnisse erfüllt werden. Kiliç et al. (2015) untersuchten ebenfalls einen Einfluss der Komponente „Perceived Learning“ (PL) bei Schülern. Die Autoren definieren PL als retrospektive Bewertung der Lernerfahrung. Die Definition entspricht der in der vorliegenden Arbeit erhobenen SE_LE. Kiliç et al. können einen Einfluss von PL auf PEOU und PU nachweisen. Der Einfluss auf PEOU ist im Modell der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt, da der Einfluss als nicht plausibel bewertet wird.

16.1 Der Einfluss von PC_SE

Die nachgewiesenen Abhängigkeiten von den „Computerfähigkeiten“ in den gruppenspezifischen Untersuchungen können im SEM nicht umfassend bestätigt werden. **Tabelle 28** fasst die Ergebnisse gegenüberstellend zusammen, wobei hier die Analysen zu Regressionsgewichten und zu Korrelationen im SEM berücksichtigt sind. Der Einfluss von PC_SE auf SE_LE und EFF können im SEM bestätigt werden, wohingegen ein Einfluss auf PU und PEOU im SEM nicht bestätigt werden konnte. PE zeigt für beide Analysen keine Abhängigkeit.

Tabelle 28: Abhängigkeiten von der Komponente PC_SE auf gruppenspezifische Unterschiede und ihr Einfluss im SEM.

Variable	Gruppenspezifische Unterschiede	SEM
SE_LE	✓	✓
EFF	✓	✓✓
PE	✗	✗
PU	✓	✗
PEOU	(✓)	✗

✓: Mindestens ein signifikanter Gruppenunterschied nachgewiesen / im SEM signifikantes Regressionsgewicht oder Korrelation (✓: kleine Effektstärke; ✓✓: mittlere Effektstärke); (✓): Kein gruppenspezifischer Unterschied, aber ein positiver Jonckheere-Terpstra-Test nachgewiesen; ✗: keine/n signifikante/n Abhängigkeit/Einfluss gefunden.

Die meisten Arbeiten weisen einen Einfluss von PC_SE auf PU und PEOU nach. Die Metaanalyse von Abdullah und Ward (2016) zeigt z. B. für den E-Learning Kontext, dass die „Computerfähigkeiten“ die beiden Komponenten maßgeblich beeinflussen. Dazu muss berücksichtigt werden, dass in der vorliegenden Arbeit eine „generelle Computerselbstwirksamkeit“ erhoben wurde. Yi und Hwang (2003) definieren diese (nach Marakas et al. 1998) als eine individuelle Beurteilung der Wirksamkeit über mehrere Computerdomänen hinweg und die „applikationsspezifische Selbstwirksamkeit“ als eine individuelle Wahrnehmung der Wirksamkeit bei der Nutzung einer bestimmten Anwendung oder eines bestimmten Systems. Agarwal et al. (2000) zeigen, dass eine „applikationsspezifische Computerselbstwirksamkeit“ ($\beta = 0,43$) einen größeren Einfluss auf PEOU aufweist als eine generelle ($\beta = 0,20$). Die Komponente „E-Learning Self-Efficacy“ in der Studie von Park (2009), die beispielsweise die Akzeptanz von Studierenden bezüglich E-Learning erhebt, kann als applikationsspezifisch betrachtet werden und weist entsprechend einen signifikanten Einfluss auf PU und PEOU auf. Auch die Studie von Kiliç et al. (2015) mit Schülern bezüglich einer Akzeptanz gegenüber Whiteboards weist den Einfluss auf PU und PEOU abhängig von einer „applikationsspezifischen Selbstwirksamkeit“ nach. Dazu in Bezug gesetzt werden kann der nicht gefundene Einfluss von PEOU auf PU. PEOU wird auch als kausaler Vorläufer der „Nützlichkeit“ beschrieben, mit indirekter Wirkung auf die Benutzerakzeptanz über einen Einfluss auf die „Nützlichkeit“ – da ein System als nützlicher angesehen wird, wenn es freier von Anstrengungen ist. Ausgehend vom TAM nach Davis (1989) bestätigen viele Arbeiten den Einfluss von PEOU auf PU (u. a. Davis et al. 1989; Lee et al. 2005; Venkatesh 2000). In der E-Learning Metaanalyse von Šumak et al. (2011) zeigt sich beispielsweise ein Einfluss von PEOU auf

PU von $\beta = 0,40$. Allerdings zeigt sich ein signifikanter Einfluss nur für Lehrer/Professoren. Es finden sich auch TAM Studien, in denen der Einfluss nicht gefunden wurde (u. a. Agarwal et al. 2000; Yi und Hwang 2003).

Agudo-Peregrina et al. (2014) beschreiben unterschiedliche Auffassungen über den Einfluss von PEOU auf PU. Im Besonderen bestehen Zweifel über den Zusammenhang, wenn bei den Benutzern eine hohe Expertise bezüglich der Technologien vorliegt (vgl. Venkatesh und Bala 2008). Scherer et al. (2019) äußern, dass die heutigen Schüler sogenannte „digital natives“ sind, die mit neuen Technologien als integraler Komponente ihres Lebens aufwachsen. Die erhobenen generellen „Computerfähigkeiten“ fallen für die Schüler entsprechend hoch aus (MW = $3,13 \pm 0,64$; 4-stufige LS). Nur 6–7 % der Schüler sind nach ihrer Einschätzung in die Gruppe mit „schlechten“ Fähigkeiten einzuordnen. Eine Stichprobe mit größeren Defiziten in den generellen „Computerfähigkeiten“ könnte einen Einfluss zeigen, jedoch werden sich diese Defizite bei Schülern nicht mehr weitreichend finden, sodass der Einfluss der PC_SE für die Schülergeneration neu bewertet werden muss und sich eine Überprüfung von „applikationsspezifischer Selbstwirksamkeit“ empfiehlt. Ebenfalls kann der Einfluss der PC_SE auf PEOU, der beispielsweise von Abdullah und Ward (2016) als bedeutend beurteilt wird, insofern relativiert werden, dass 63 % der von den Autoren untersuchten Studien diesen Einfluss nicht finden. Zudem wird hier nicht zwischen genereller und „applikationsspezifischer Selbstwirksamkeit“ differenziert. Dieser Argumentation folgend, kann auch erklärt werden, wieso sich der Einfluss von EFF auf PU nicht bestätigt hat. Wie oben ausgeführt, steht die Definition der Komponente in direktem Bezug zur Definition von PEOU. Die Schüler weisen im Rahmen der LMS für EFF die höchsten Bewertungen auf (MW = $3,30 \pm 0,55$; 4-stufige LS), sodass die Arbeit mit der Simulation als frei von Anstrengung und Bemühungen bewertet wird. Entsprechend konnte auch der Einfluss von EFF auf PU nicht bestätigt werden.

16.2 Korrelationsanalysen

Die Ergebnisse der berücksichtigten Korrelationsanalysen zwischen den Einflussvariablen sind in **Tabelle 29** zusammengefasst. PE und PC_SE korrelieren jeweils mit SE_LE und EFF und SE_LE und EFF korrelieren untereinander.

Kiliç et al. (2015) untersuchten den Einfluss der Technologieselbstwirksamkeit (bzgl. Whiteboards) auf oben beschriebene PL und zeigen auf, dass eine höhere Selbstwirksamkeit den Schülern helfen kann, von der Technologie zu profitieren. Ihre Ergebnisse weisen einen hohen Einfluss nach ($\beta = 0,61$), was der Korrelation zwischen PC_SE und SE_LE in der vorliegenden Arbeit entspricht.

Tabelle 29: Korrelationszusammenhänge zwischen den Einflussvariablen des aufgestellten SEM.

Variablen	PE	PC_SE	SE_LE	EFF
PE	-			
PC_SE	✘	-		
SE_LE	✓✓✓	✓	-	
EFF	✓✓	✓✓	✓✓	-

✓: kleine Effektstärke; ✓✓: mittlere Effektstärke; ✓✓✓: große Effektstärke; ✘: keine signifikante Korrelation gefunden.

Die Korrelation zwischen SE_LE und EFF kann mit der beschriebenen Motivationsabhängigkeit von Dohn et al. (2016) erklärt werden. Je stärker der Glaube in die eigenen Fähigkeiten ist, desto größer und anhaltender sind auch die Bemühungen (vgl. auch Bandura 2001). Auch die Korrelation zwischen PC_SE und EFF entspricht diesem Befund und wurde bereits bezüglich der Abhängigkeiten der Motivation von den „Computerfähigkeiten“ diskutiert. Die von Bandura (1982) definierte Selbstwirksamkeit bezieht sich auf die individuelle Einschätzung über die eigenen Möglichkeiten zur Durchführung einer Aufgabe. Es wurde gezeigt, dass die „Selbstwirksamkeit im Sinne des Lernerfolgs“ für die Schüler eine größere Rolle spielt als die Selbstwirksamkeit bezüglich ihrer „Computerfähigkeiten“. Die Korrelation zwischen SE_LE und PC_SE wurde bereits bezüglich der LMS diskutiert (vgl. Kapitel 15.2.2). Die Korrelation zwischen PE und EFF erklärt sich mit der Motivationstheorie, nach der emotionales Erleben auf das Interesse einwirkt (Bergin 1999).

Es gilt zu beachten, dass im SEM die beiden Untersuchungsgruppen (Setup-Gruppe und PC-Gruppe) nicht getrennt voneinander untersucht wurden, sondern ein Modell für beide Gruppen aufgestellt wurde. Die untersuchte Einflussvariable PE weist allerdings eine Abhängigkeit von der verwendeten Simulationsumsetzung auf. Die Schüler der Setup-Gruppe (Mdn = 3,80; IQR = 1,00; 5-stufige LS) bewerteten die Komponente signifikant höher als die Schüler der PC-Gruppe (Mdn = 3,40; IQR = 1,20; $**r = 0,21$). Dieser Unterschied wurde im SEM nicht berücksichtigt. Der Einfluss von PE auf PU bzw. PEOU könnte entsprechend für die beiden Simulationsumsetzungen unterschiedlich ausfallen und sollte aufgrund seines großen Regressionsgewichtes für eine differenziertere Betrachtung in Folgestudien getrennt voneinander untersucht werden.

17 Hypothesen Bewertung

Die formulierten Hypothesen zur Neurosimulation und dem EPhys-Setup können demnach wie folgt bewertet werden:

- **Die Hypothese 4a „Die Arbeit mit dem EPhys-Setup/der Neurosimulation fördert die Motivation der Schüler“ wurde bestätigt.**
- **Die Hypothese 4b „Die Hands-on Laborkomponenten des EPhys-Setups steigern die Motivation“ konnte nur teilweise bestätigt werden.**
Ein Einfluss findet sich nur auf die Komponente „Interest“.
- **Die Hypothese 4c „Die zugrunde liegende Computerfähigkeit sowie das Biologieinteresse beeinflussen die Motivation“ wurde bestätigt.**
Die „Computerfähigkeiten“ weisen einen großen Einfluss auf die Komponente „Effort“ und „Selbstwirksamkeit“ auf. Der Einfluss auf die Komponente „Interest“ kann nur in einem Trend der Mediane festgestellt werden. Alle Komponenten der LMS weisen eine Abhängigkeit vom Biologieinteresse auf. SE_LE zeigt die größte Abhängigkeit, anschließend EFF und INT.
- **Die Hypothese 5a „Die Schüler weisen gegenüber dem EPhys-Setup/der Neurosimulation eine Technologieakzeptanz auf“ wurde bestätigt.**
- **Die Hypothese 5b „Die Hands-on Laborkomponenten des EPhys-Setups steigern die Technologieakzeptanz“ kann nur bezüglich der „wahrgenommenen Freude“ bestätigt werden.**
Ein Einfluss auf die Kernkomponenten des TAM konnte nicht nachgewiesen werden, allerdings zeigt das SEM, dass PE einen Einfluss auf PU und PEOU aufweist.
- **Die Hypothese 5c „Die zugrunde liegenden ‚Computerfähigkeiten‘ sowie das Biologieinteresse beeinflussen die Technologieakzeptanz“ wurde für das Biologieinteresse bestätigt und muss für die „Computerfähigkeiten“ differenziert betrachtet werden.**
Die „Computerfähigkeiten“ spielen bei der Bewertung von PU eine Rolle und tendenziell auch bei der PEOU, allerdings konnte dieser Einfluss im SEM nicht bestätigt werden. Auf die PE zeigen beide Analysen keinen Einfluss der PC_SE. Das Biologieinteresse dagegen wirkt stark auf die Technologieakzeptanz. Alle drei Komponenten des TAM zeigen eine Abhängigkeit.

18 Fazit und Ausblick

18.1 Feedback-Erhebung

Im „Schülerlabor Neurowissenschaften“ wird Schülern verschiedener Jahrgangsstufen die Möglichkeit gegeben, sich praktisch-experimentell mit den Themenfeldern der Neuro- und Verhaltensbiologie auseinanderzusetzen. Der entsprechende Bedarf konnte mit einer Evaluierung der Lehrkräfte gezeigt werden. Wenige Lehrkräfte bieten für den Bereich der Neurobiologie experimentelle Zugänge in der Schule an, was mit einem bestehenden Mangel an einfachen, überzeugenden und kostengünstigen Werkzeugen erklärt werden kann. Für ein differenzierteres Bild sollte in künftigen Studien – neben der Erhebung zu einzelnen Themenfeldern – expliziter betrachtet werden, wie viele Experimente von der einzelnen Lehrkraft durchgeführt werden, um so den Anteil im Unterricht genauer einschätzen zu können. Weiterhin kann es von Interesse sein, die Art der Experimente zu erfragen, um etwa die Authentizität der eingesetzten Experimente in der Schule einschätzen zu können. So könnten die Angebote von außerschulischen Lernorten bedarfsorientierter ausgerichtet werden.

Die SLT der Sekundarstufe II wurden in der Gesamtbetrachtung von den Lehrkräften sehr positiv bewertet. Die Konzepte entsprechen demnach den Anforderungen der Lehrkräfte. Die praktische Vermittlung der neurobiologischen Inhalte zeigt weiterhin vielfältige positive Effekte für die Schüler. Es kann festgehalten werden, dass die Qualität der drei Konzepte von den Schülern sehr hoch bewertet wurde und auch die nicht interessierten Schüler positive Rückmeldungen gaben. Allerdings wurde in der vorliegenden Arbeit ein generelles „Ausgangsinteresse für Biologie und Forschung“ adressiert und als unabhängige Variable definiert. Eine Analyse der Bewertung ausgehend von einem inhaltsspezifischen Interesse sollte nachgeholt werden, um den Befund zu verifizieren oder neu zu bewerten. Die Bewertung des „Einblicks in wissenschaftliche Forschungsarbeit“ zeigt eine größere Varianz als gewünscht. Es ist anzustreben, diese große Varianz der Rückmeldungen der Schüler zu minimieren. Durch die Schwerpunktsetzung vieler Schülerlabore auf die Vermittlung von authentischer Forschungsarbeit, scheint es von Bedeutung zu sein, ein besonderes Augenmerk darauf zu legen, wie Schülern die Authentizität der angebotenen Experimente vermittelt werden kann. Die Vermittlung kann nur gelingen, wenn den Schülern der Zugang zur authentischen Forschungsarbeit bewusst ist; so kann ihnen eine angemessene Berufsorientierung ermöglicht werden.

Die retrospektive Prä-Post-Erhebung der vorliegenden Arbeit zeigt eine höchst signifikante Steigerung der Items „Wissen“, „Anwendungszuversicht“ und „Interesse am Thema“. Alle SLT fördern entsprechend – neben der gut bewerteten Qualität der Konzepte – den Lernzuwachs und das Interesse. Die Förderung zeigt sich besonders für die Schüler mit niedrigen Ausgangswerten. Allerdings

kann anhand des Einzelitems zur Interessensänderung die Einschränkung der retrospektiven Erhebung differenzierter bewertet werden. So liegt ein großer Interessensanstieg durch den Besuch des Schülerlabors für alle drei Gruppierungen der retrospektiven Erhebung vor. Eine entsprechende Analyse für den Lernzuwachs steht aus. Ebenfalls sollte der Zusammenhang zwischen gesteigertem Interesse und einem inhaltspezifischen Wissenszuwachs überprüft werden, um die Qualität der Inhaltsvermittlung genauer zu überprüfen und eventuelle Defizite im Wissen zu einzelnen Inhalten genauer identifizieren zu können.

18.2 EPhys-Setup und Neurosimulation

Um den weitreichenden Verständnisproblemen in der Elektrophysiologie entgegenzuwirken, wurde ein quasi-reales EPhys-Setup entwickelt, um Schülern einen experimentellen Zugang zu elektrophysiologischen Messungen zu ermöglichen. Innovative Lerntechnologien bieten die Möglichkeiten, das Verständnis von Lernenden zu verbessern, Gelegenheit zur Diskussion zu schaffen, Kompetenzen der Lernenden anhand praktischer Erfahrungen zu entwickeln und die Lernergebnisse zu verbessern. Diese Erwartungen sind jedoch nur zutreffend, wenn die Lernenden daran interessiert sind, die Technologien zu benutzen. Die Ergebnisse zeigen, dass beide Simulationsumsetzungen Motivation generieren und die Schüler ihnen gegenüber eine Technologieakzeptanz aufweisen. Ein Vergleich der Setup-Gruppe mit der Kontrollgruppe, welche die Neurosimulation ohne Hands-on Komponenten verwendet hat, weist ausschließlich für Komponenten der „Freude“ und damit für den intrinsischen Bereich niedrigere Bewertungen auf. Die Hands-on Komponenten spielen demnach nur eine untergeordnete Rolle und haben keinen Einfluss auf den selbsteingeschätzten Lernzuwachs. Die Authentizitätswahrnehmung der Setup-Gruppe ist dagegen etwas ausgeprägter.

Der Einfluss des zugrunde liegenden Biologieinteresses sowie der „Computerfähigkeiten“ auf die Bewertungen der drei Testskalen ist in vielen Fällen höher als der Einfluss der verwendeten Simulationsumsetzung. Vom individuellen Biologieinteresse der Schüler zeigen alle untersuchten Komponenten eine Abhängigkeit. Die höchsten Effekte beziehen sich auf die Komponenten der „Lernwirksamkeit“ oder der „Freude“. Von den individuellen „Computerfähigkeiten“ der Schüler zeigen Komponenten zur „Zuversicht bezüglich der Methoden und der Inhalte“ eine Abhängigkeit.

Das Strukturgleichungsmodell stellt dar, welche Einflussvariablen auf die beiden Kernkomponenten „wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“ (PEOU) und „wahrgenommene Nützlichkeit“ (PU) des TAM wirken. Die Gütekriterien der Modellanalyse belegen, dass das Modell als plausibel gelten kann. Die „wahrgenommene Freude“, die „Selbstwirksamkeit im Sinne des Lernerfolgs“ sowie die „notwendigen Bemühungen“ bei der Arbeit mit der Simulationsumsetzung zeigen einen Einfluss auf PU

und/oder PEOU. Für die „Computerfähigkeiten“ konnte im SEM kein Einfluss auf die Kernkomponenten nachgewiesen werden. Die vier untersuchten Einflussvariablen erklären 51 % der Varianz von PU und 44 % der Varianz von PEOU. Die Komponente der „Computerselbstwirksamkeit“ sollte im TAM für die Generation der Schüler, die eine hohe Expertise für Technologien aufweist, neu bewertet werden. Die Überprüfung einer „applikationsspezifischen Selbstwirksamkeit“ ist als lohnenswert zu beurteilen. Ausgehend vom großen Einfluss des Biologieinteresses, ist das Ziel von Schülerlaboren, das Interesse bei Schülern zu fördern, von besonderer Bedeutung. Follow-up-Studien wären nötig, um die gefundenen positiven Effekte in ihrer Nachhaltigkeit zu überprüfen. Die Ergebnisse aus Schülerlabor Studien sind diesbezüglich nicht einheitlich.

18.3 Ausblick

Da die Hands-on Komponenten nur geringen Einfluss zeigten, kann auch der Einsatz der Neurosimulation für Schüler lohnend sein. Dabei darf die Neurosimulation nicht als Ersatz des eigentlichen Forschungsexperiments betrachtet werden, sondern stellt im Kontext der Schülerbildung vielmehr eine einzigartige Zugangsmöglichkeit dar, die den Schülern sonst nicht geboten werden könnte.

Inzwischen existiert eine erste Weiterentwicklung der Neurosimulation, die im Rahmen einer Unterrichtskonzeption zum Einsatz für den Schulunterricht konzipiert wurde (Zimmermann und Dierkes 2019). Dafür wurde die Programmierung von der MatLab Umgebung gelöst und mit dem Anwendungsframework Qt (Digia, The Qt Company) neu geschrieben (C++). Die Software ist frei zugänglich und kann von Lehrkräften mit unterstützenden Begleitmaterialien, Erklärungsskripten und Arbeitsblättern im Unterricht eingesetzt werden. Die Schwerpunktsetzung liegt in diesem Unterrichtskonzept bei den Glutamat-Rezeptoren und ermöglicht neben der Untersuchung verschiedener Nervenzellen, die Applikationen von Agonisten und Antagonisten sowie die Untersuchung einer synaptischen Übertragung.

Das erfolgreiche Konzept des „Schülerlabors Neurowissenschaften“ wird im Rahmen eines Folgeprojekts über seinen jetzigen regionalen Aktionsradius hinaus im Internet verfügbar gemacht. Mit dem Projekt digNis („digitale Neurowissenschaften in der Schule“) können die innovativen Anwendungen wie die Neurosimulation (vgl. auch Zimmermann und Dierkes 2019) oder das virtuelle Mikroskop (Greßler et al. 2017) nachhaltig einer großen Zielgruppe zugänglich gemacht werden. Schwerpunkt ist eine digitale praktische Vermittlung von neurowissenschaftlicher Forschung und ihren Methoden für die gymnasiale Oberstufe. Die Bereitstellung über das Internet begegnet dem Problem

des Wirkungsradius von Schülerlaboren und kann Schulen bundesweit erreichen. Besonderer Wert wird auf die didaktische Konzeption der Arbeitsmaterialien gelegt, die sowohl interaktive PDF-Arbeitszettel für die Schüler bereitstellen als auch Lösungs- und Erklärungsmaterialien für die Lehrkräfte sowie begleitendes Infomaterial zur Vorbereitung der Versuche. Letzteres ist für einen akzeptierten und erfolgreichen Einsatz der Tools von besonderer Bedeutung. Das Monist-Projekt der Universität Bielefeld erkannte bereits folgendes Problem: *„Für das Lernen mit Simulationen im Studium (oder in der Schule) fehlen jedoch klare Einsatzkonzepte: Weder existieren anwendbare Werkzeuge, noch genügend Inhalte, noch eine ausgereifte Didaktik für Modellsimulationen in der Lehre“* (Egelhaaf 2004, S 3). Dadurch eignen sich die vielen wissenschaftlichen Simulationen häufig nur eingeschränkt für die Lehre. In dem Projektbericht wird weiter ausgeführt, dass Simulationswerkzeuge sehr wenig in der Lehre eingesetzt werden und deren Potenzial nicht ausgeschöpft wird. Das Projekt konzentrierte sich auf den Hochschulbereich (Egelhaaf 2004). Der Kritik des Monist-Projekts, dass auch ein Mangel an erprobten Einsatzkonzepten vorläge, soll mit einer wissenschaftlichen Begleitung des digNiS Projekts begegnet werden. Alle Konzepte und Entwicklungen werden im Rahmen des „Schülerlabors Neurowissenschaften“ mit Kursen erprobt und Rückmeldungen bei den Schülern und Lehrkräften werden eingeholt. Mit dieser Konzeptionsphase soll sichergestellt werden, dass die Schüler die Materialien und Bedienung der Programme verstehen und dass die Lehrkräfte den Konzepten gegenüber positiv eingestellt sind und diese ihren Erwartungen entsprechen. Nach Bereitstellung der Konzepte im Internet, werden neben einer umfangreichen Benutzeranalyse auch Befragungen an teilnehmenden Schulen stattfinden. Angedacht ist u. a. der Einsatz des bewährten TAM. Von besonderem Interesse ist der nun wichtige Aspekt der Technologieakzeptanz der Lehrkräfte, da der Einsatz der digNiS Konzepte im Unterricht von ihnen abhängt (vgl. u. a. Al-alak und Alnawas 2011). Scherer et al. (2019) bieten eine aktuelle Metaanalyse zur Technologieakzeptanz von Lehrkräften. Insgesamt erklärt das TAM die Akzeptanz der Lehrkräfte gut – PU und PEOU zeigen einen signifikanten Einfluss auf die „Nutzungsabsicht“ der Technologien. Jedoch wurden nur 15 % der berücksichtigten Studien bei Lehrkräften durchgeführt und keine der Studien kommt aus Deutschland. Das Forschungsfeld bietet also viel Potenzial, um den Einsatz von Technologien und im Speziellen der Technologien des digNiS Projekts bei Lehrkräften an deutschen Schulen zu verstehen. Gleichzeitig bietet die Beforschung das Potenzial, die Technologien entsprechend anzupassen, um über die Akzeptanz der Lehrkräfte ihren Einsatz im Unterricht zu gewährleisten.

Literaturverzeichnis

- Abdullah, F.; Ward, R. (2016): Developing a general extended technology acceptance model for e-Learning (GETAMEL) by analysing commonly used external factors. In: *Computers in Human Behavior* 56, S. 238–256. DOI: 10.1016/j.chb.2015.11.036.
- Abteilung Lehre und Qualitätssicherung (Hg.) (2015): Lehrveranstaltungsevaluation. Unter Mitarbeit von studiumdigitale. Goethe Universität Frankfurt. Online verfügbar unter http://www.uni-frankfurt.de/71044617/Informationen_f%C3%BCr_Lehrende, zuletzt geprüft am 08.10.2019.
- Agarwal, R.; Sambamurthy, V.; Stair, R. M. (2000): Research report: The evolving relationship between general and specific computer self-efficacy - An empirical assessment. In: *Information Systems Research* 11 (4), S. 418–430. DOI: 10.1287/isre.11.4.418.11876.
- Agudo-Peregrina, Á. F.; Hernández-García, Á.; Pascual-Miguel, F. J. (2014): Behavioral intention, use behavior and the acceptance of electronic learning systems: Differences between higher education and lifelong learning. In: *Computers in Human Behavior* 34, S. 301–314. DOI: 10.1016/j.chb.2013.10.035.
- Ajzen, I.; Fishbein, M. (1980): Understanding attitudes and predicting social behavior. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Al-alak, B. A.; Alnawas, I. A. M. (2011): Measuring the acceptance and adoption of e-learning by academic staff. In: *Knowledge Management & E-Learning: An International Journal* 3 (2), S. 201–221. DOI: 10.34105/j.kmel.2011.03.016.
- Albarracín, A. L.; Farfán, F. D.; Coletti, M. A.; Teruya, P. Y.; Felice, C. J. (2016): Electrophysiology for biomedical engineering students: a practical and theoretical course in animal electrocorticography. In: *Advances in Physiology Education* 40 (3), S. 402–409. DOI: 10.1152/advan.00073.2015.
- Av-Ron, E.; Byrne, J. H.; Baxter, D. A. (2006): Teaching basic principles of neuroscience with computer simulations. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 4 (2), A40-A52. 23493644.
- Av-Ron, E.; Byrne, M. J.; Byrne, J. H.; Baxter, D. A. (2008): SNNAP: A tool for teaching neuroscience. In: S. Lorenz und M. Egelhaaf (Hg.): *Interactive Educational Media for the Neural and Cognitive Sciences*, 3, bmm1408: Brains, Minds & Media.
- Baltes-Götz, B. (2015): Analyse von Strukturgleichungsmodellen mit Amos 18. Universität Trier. Zentrum für Informations-, Medien- und Kommunikationstechnologie (ZIMK). Online verfügbar unter <https://www.uni-trier.de/fileadmin/urt/doku/amos/v18/amos18.pdf>, zuletzt geprüft am 08.10.2019.
- Bandura, A. (1982): Self-efficacy mechanism in human agency. In: *American Psychologist* 37 (2), S. 122–147. DOI: 10.1037/0003-066X.37.2.122.
- Bandura, A. (2001): Social cognitive theory: an agentic perspective. In: *Annual Review of Psychology* 52, S. 1–26. DOI: 10.1146/annurev.psych.52.1.1.
- Barry, P. H. (1990): Membrane potential simulation program for IBM-PC-compatible equipment for physiology and biology students. In: *American Journal of Physiology* 259 (6), S. 15–23. DOI: 10.1152/advances.1990.259.6.S15.
- Barry, P. H. (1994): ARTMEM - An interactive graphical program simulating membrane potential measurements across artificial membranes. In: *Annals of Biomedical Engineering* 22 (2), S. 218–225. DOI: 10.1007/BF02390380.
- Barry, S. R. (2004): Media Review. Neurons in Action: Computer Simulations with NeuroLab. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 2 (2), R6-R7.

- Baumert, J.; Bos, W.; Watermann, R. (1998): TIMSS/III Schülerleistungen am Ende der Sekundarstufe II im internationalen Vergleich. Berlin: Max-Planck-Institut für Bildungsforschung.
- Baumert, J.; Klieme, E.; Neubrand, M.; Prenzel, M.; Schiefele, U.; Schneider, W. et al. (2001): PISA 2000 - Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Bereich. Opladen: Leske + Budrich.
- Baxter, D. A.; Byrne, J. H. (2007): Simulator for neural networks and action potentials: Description and application. In: C. J. Crasto (Hg.): *Methods in Molecular Biology: Neuroinformatics*. Totowa N.J.: Humana Press, S. 127–154.
- Beauducel, A.; Wittmann, W. W. (2005): Simulation study on fit indexes in CFA based on data with slightly distorted simple structure. In: *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal* 12 (1), S. 41–75. DOI: 10.1207/s15328007sem1201_3.
- Berck, K.-H.; Graf, D. (2018): *Biologiedidaktik. Grundlagen und Methoden*. 5. Aufl. Wiebelsheim: Quelle & Meyer Verlag.
- Bergin, D. A. (1999): Influences on classroom interest. In: *Educational Psychologist* 34 (2), S. 87–98. DOI: 10.1207/s15326985ep3402_2.
- Betz, A. (2018): Der Einfluss der Lernumgebung auf die (wahrgenommene) Authentizität der linguistischen Wissenschaftsvermittlung und das Situationale Interesse von Lernenden. In: *Unterrichtswissenschaft* 46 (3), S. 261–278. DOI: 10.1007/s42010-018-0021-0.
- Betz, A.; Flake, S.; Mierwald, M.; Vanderbeke, M. (2016): Modelling authenticity in teaching and learning contexts: a contribution to theory development and empirical investigation of the construct. In: C. K. Looi, J. Polman, U. Cress und P. Reinmann (Hg.): *Transforming learning, empowering learners: the International Conference of the Learning Sciences (ICLS)*, Bd. 2. Singapur: International Society of the Learning Sciences, S. 815–818.
- Bibliographisches Institut GmbH (2019): "Motivation, die". Hg. v. Olaf Carstens, Joachim Herbst, Dudenverlag. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Motivation>, zuletzt aktualisiert am 25.07.2019, zuletzt geprüft am 08.10.2019.
- Biosoft: Software for Science (2015): NeuroSim. Online verfügbar unter <http://www.biosoft.com/w/neurosim.htm>, zuletzt aktualisiert am 20.04.2015, zuletzt geprüft am 08.10.2019.
- Birkett, M.; Shelton, K. (2011): Decreasing neuroscience anxiety in an introductory neuroscience course: an analysis using data from a modified science anxiety scale. In: *Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 10 (1), A37-A43. 23626491.
- Bish, J. P.; Schleidt, S. (2008): Effective use of computer simulations in an introductory neuroscience laboratory. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 6 (2), A64-A67. 23493239.
- Bortz, J. (2005): *Statistik. Für Human- und Sozialwissenschaftler*. 6. Aufl. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Bortz, J.; Döring, N. (2006): *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. 4. Aufl. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Brandt, A. (2005): *Förderung von Motivation und Interesse durch außerschulische Experimentierlabors*. Göttingen: Cuvillier Verlag.
- Braun, H. A. (2003): Virtual versus real laboratories in life science education: Concepts and experiences. In: N. Jukes und M. Chiuiua (Hg.): *From guinea pig to computer mouse. Alternative methods for a progressive, humane education*. 2. Aufl. Leicester: InterNICHE, S. 81–87.

- Braund, M.; Reiss, M. (2006): Towards a More Authentic Science Curriculum: The contribution of out-of-school learning. In: *International Journal of Science Education* 28 (12), S. 1373–1388. DOI: 10.1080/09500690500498419.
- Brette, R.; Rudolph, M.; Carnevale, T.; Hines, M.; Beeman, D.; Bower, J. M. et al. (2007): Simulation of networks of spiking neurons: a review of tools and strategies. In: *Journal of Computational Neuroscience* 23 (3), S. 349–398. DOI: 10.1007/s10827-007-0038-6.
- Brinson, J. R. (2015): Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research. In: *Computers & Education* 87, S. 218–237. DOI: 10.1016/j.compedu.2015.07.003.
- Bühner, M. (2011): Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion. 3., aktualisierte und erw. Aufl. München: Pearson Studium (PS Psychologie).
- Cardozo, D. (2016): An intuitive approach to understanding the resting membrane potential. In: *Advances in Physiology Education* 40 (4), S. 543–547. DOI: 10.1152/advan.00049.2016.
- Cardozo, D. L. (2005): A model for understanding membrane potential using springs. In: *Advances in Physiology Education* 29 (4), S. 204–207. DOI: 10.1152/advan.00067.2004.
- Carmines, E. G.; McIver, J. P. (1981): Analyzing models with unobserved variables: Analysis of covariance structures. In: G. W. Bohrnstedt und E. F. Borgatta (Hg.): *Social Measurement: Current Issues*. Beverly Hills: SAGE Publications, S. 65–115.
- Carvalho, H. (2011): A group dynamic activity for learning the cardiac cycle and action potential. In: *Advances in Physiology Education* 35 (3), S. 312–313. DOI: 10.1152/advan.00128.2010.
- Chen, H.; Kelly, M.; Hayes, C.; van Reyk, D.; Herok, G. (2016): The use of simulation as a novel experiential learning module in undergraduate science pathophysiology education. In: *Advances in Physiology Education* 40 (3), S. 335–341. DOI: 10.1152/advan.00188.2015.
- Chinn, C. A.; Malhotra, B. A. (2002): Epistemologically authentic inquiry in schools: A theoretical framework for evaluating inquiry tasks. In: *Science Education* 86 (2), S. 175–218. DOI: 10.1002/sce.10001.
- Cohen, J. (1988): *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2. Aufl. New York: Academic Press.
- Cohen, J. (1992): A power primer. In: *Psychological Bulletin* 112 (1), S. 155–159. DOI: 10.1037/0033-2909.112.1.155.
- Corter, J. E.; Esche, S. K.; Chassapis, C.; Ma, J.; Nickerson, J. V. (2011): Process and learning outcomes from remotely-operated, simulated, and hands-on student laboratories. In: *Computers & Education* 57 (3), S. 2054–2067. DOI: 10.1016/j.compedu.2011.04.009.
- Crisp, K. M. (2012): A structured-inquiry approach to teaching neurophysiology using computer simulation. In: *Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 11 (1), A132-A138. 23494064.
- Dabrowski, K. M.; Castaño, D. J.; Tartar, J. L. (2013): Basic neuron model electrical equivalent circuit. An undergraduate laboratory exercise. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 12 (1), A49-A52.
- Dagda, R. K.; Thalhauser, R. M.; Dagda, R.; Marzullo, T. C.; Gage, G. J. (2013): Using crickets to introduce neurophysiology to early undergraduate students. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 12 (1), A66-A74. 24319394.
- Dähnhardt, D.; Haupt, O. J.; Pawek, C. (2009): Neugier wecken, Kompetenzen fördern: Wie Schülerlabore arbeiten. In: D. Dähnhardt, O. J. Haupt und C. Pawek (Hg.): *Kursbuch 2010 - Schülerlabore in Deutschland*. Marburg: Tectum Verlag, S. 12–28.

- Davis, F. D. (1985): A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems. Theory and results. Dissertation. Sloan School of Management, Massachusetts. Institute of Technology.
- Davis, F. D. (1987): User acceptance of information systems. The technology acceptance model (TAM). Working Paper. University of Michigan, Michigan. School of Business Administration.
- Davis, F. D. (1989): Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. In: *MIS Quarterly* 13 (3), S. 319–340.
- Davis, F. D.; Bagozzi, R. P.; Warshaw, P. R. (1989): User acceptance of computer technology: A comparison of two theoretical models. In: *Management Science* 35 (8), S. 982–1003. DOI: 10.1287/mnsc.35.8.982.
- Davis, F. D.; Bagozzi, R. P.; Warshaw, P. R. (1992): Extrinsic and intrinsic motivation to use computers in the workplace. In: *Journal of Applied Social Psychology* 22 (14), S. 1111–1132. DOI: 10.1111/j.1559-1816.1992.tb00945.x.
- Davis, M. J. (2001): Basic principles of synaptic physiology illustrated by a computer model. In: *Advances in Physiology Education* 25 (1), S. 1–12.
- Deal, A. L.; Erickson, K. J.; Bilsky, E. J.; Hillman, S. J.; Burman, M. A. (2014): K-12 neuroscience education outreach program. Interactive activities for educating students about neuroscience. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 13 (1), A8-A20. 25565921.
- Deci, E. L. (1992): The relation of interest to the motivation of behavior: a self-determination theory perspective. In: K. A. Renninger, S. Hidi und A. Krapp (Hg.): *The Role of Interest in Learning*. Hillsdale: NJ, Erlbaum, S. 43–70.
- Deci, E. L.; Ryan, R. M. (2000): The 'what' and 'why' of goal pursuits: Human needs and the self-determination of behavior. In: *Psychological Inquiry* 11 (4), S. 227–268. DOI: 10.1207/S15327965PLI1104_01.
- Deligiannidi, K.; Howard-Jones, P. A. (2015): The neuroscience literacy of teachers in Greece. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 174, S. 3909–3915. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.01.1133.
- Demir, S. S. (2006): Interactive cell modeling web-resource, iCell, as a simulation-based teaching and learning tool to supplement electrophysiology education. In: *Annals of Biomedical Engineering* 34 (7), S. 1077–1087. DOI: 10.1007/s10439-006-9138-0.
- Dewhurst, D. (2006): Computer-based alternatives in higher education - past, present and future. In: *Alternatives to Animal Experimentation* 23 (3), S. 197–201.
- Dierkes, P. (2010): Forschen, Lernen und Lehren im Schülerlabor. Das Goethe-BioLab verbindet attraktive Lernangebote mit didaktischer Forschung. In: *Forschung Aktuell* 1/2, S. 44–47.
- Dierkes, P.; Lehmann, A. (2019): Wie funktioniert das Gehirn? Moleküle, Neuronen und Netzwerke als Schlüssel zum Verständnis. In: *Unterricht Biologie - Friedrich Verlag* 441, S. 2–11.
- Diwakar, S.; Kumar, D.; Radhamani, R.; Sasidharakurup, H.; Nizar, N.; Achuthan, K. et al. (2016): Complementing education via virtual labs: Implementation and deployment of remote laboratories and usage analysis in South Indian villages. In: *International Journal of Online Engineering* 12 (3), S. 8–15. DOI: 10.3991/ijoe.v12i03.5391.
- Diwakar, S.; Parasuram, H.; Medini, C.; Raman, R.; Nedungadi, P.; Wiertelak, E. et al. (2014): Complementing neurophysiology education for developing countries via cost-effective virtual labs. Case studies and classroom scenarios. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 12 (2), A130-A139. 3970995.

- Dohn, N. B.; Fago, A.; Overgaard, J.; Madsen, P. T.; Malte, H. (2016): Students' motivation toward laboratory work in physiology teaching. In: *Advances in Physiology Education* 40 (3), S. 313–318. DOI: 10.1152/advan.00029.2016.
- Dwyer, T. M.; Fleming, J.; Randall, J. E.; Coleman, T. G. (1997): Teaching physiology and the world wide web: electrochemistry and electrophysiology on the Internet. In: *American Journal of Physiology* 273 (6 Pt 3), S. 2–13. DOI: 10.1152/advances.1997.273.6.S2.
- Egelhaaf, M. (2004): Schlussbericht Projekt Monist. Universität Bielefeld. Fakultät für Biologie, LS Neurobiologie.
- Engeln, K. (2004): Schülerlabors. Authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit, Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken. Dissertation. Christian-Albrechts-Universität, Kiel. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.
- Engeln, K.; Euler, M. (2004): Forschen statt Pauken. Aktives Lernen im Schülerlabor. In: *Physik Journal* 3 (11), S. 45–48.
- Estriegana, R.; Medina-Merodio, J.-A.; Barchino, R. (2019): Student acceptance of virtual laboratory and practical work: An extension of the technology acceptance model. In: *Computers & Education* 135, S. 1–14. DOI: 10.1016/j.compedu.2019.02.010.
- Euler, M. (2005): Schülerinnen und Schüler als Forscher: Informelles Lernen im Schülerlabor. In: *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik* 16 (90), S. 4–12.
- Euler, M. (2010): Schülerlabore: Lernen durch Forschen und Entwickeln. In: E. Kircher, R. Girwitz und P. Häußler (Hg.): *Physikdidaktik. Theorie und Praxis*. 2. Aufl. Berlin: Springer, S. 799–818.
- Eyer, C. L. (2003): Teaching the basics of electrophysiology. In: *American Journal of Pharmaceutical Education* 67 (2), 250-258. DOI: 10.5688/aj670265.
- Falk, R. F.; Miller, N. B. (1992): *A primer for soft modeling*. 1. Aufl. Akron, Ohio: The University of Akron Press.
- Field, A. P. (2009): *Discovering statistics using SPSS. (and sex, drugs and rock 'n' roll)*. 3. Aufl. Los Angeles: SAGE Publications.
- Field, A. P. (2018): *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. 5. Aufl. Los Angeles: Sage.
- Fischer, M. E.; Hirsch, M.; Braun, H. A.: 'SimNerv' - Simulation of sum - Action potentials in the ischiadic nerve of the frog with a virtual physiology lab. Annual Symposium on Computer Application in Medical Care. Symposium on Computer Applications in Medical Care.
- Friesen, W. O.; Friesen, J. (2010): *NeuroDynamix II*. 2. Aufl. Oxford: Oxford University Press.
- Fritz, C. O.; Morris, P. E.; Richler, J. J. (2012): Effect size estimates: current use, calculations, and interpretation. In: *Journal of experimental Psychology. General* 141 (1), S. 2–18. DOI: 10.1037/a0024338.
- Gerstenmaier, J.; Mandl, H. (1995): Wissenserwerb unter konstruktivistischer Perspektive. In: *Zeitschrift für Pädagogik* 41 (6), S. 867–888.
- Giuliodori, M. J.; Zuccolilli, G. (2004): Postsynaptic potential summation and action potential initiation: function following form. In: *Advances in Physiology Education* 28 (2), S. 79–80. DOI: 10.1152/advan.00051.2003.
- Glowinski, I. (2007): Schülerlabore im Themenbereich Molekularbiologie als Interesse fördernde Lernumgebung. Dissertation. Christian-Albrechts-Universität, Kiel. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.
- Granić, A.; Marangunić, N. (2019): Technology acceptance model in educational context: A systematic literature review. In: *British Journal of Educational Technology* 56 (5), S. 2572–2593. DOI: 10.1111/bjet.12864.

- Greßler, A.; Zimmermann, S.; Weislogel, K.; Pfeiffer, M.; Fingerhut, M.; Klauer, G. et al. (2017): Virtuelle Mikroskopie. Eine Zukunftsperspektive für den Biologieunterricht in der Schule? In: *Journal für Didaktik der Naturwissenschaften und der Mathematik (P/S)* (1), S. 20–34.
- Griff, E. (2018): The Leaky Neuron: Understanding synaptic integration using an analogy involving leaky cups. In: *CourseSource* 5. DOI: 10.24918/cs.2018.11.
- Griff, E. R. (2006): How neurons work: An analogy & demonstration using a sparkler & a frying pan. In: *The American Biology Teacher* 68 (7), S. 412–417. DOI: 10.2307/4452029.
- Griffin, J. D. (2003): Technology in the teaching of neuroscience: Enhanced student learning. In: *Advances in Physiology Education* 27 (1-4), S. 146–155. DOI: 10.1152/advan.00059.2002.
- Grisham, W. (2009): Modular digital course in undergraduate neuroscience education (MDCUNE): A website offering free digital tools for neuroscience educators. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 8 (1), A26-A31. 3592707.
- Grisham, W.; Schottler, N. A.; Krasne, F. B. (2008): SWIMMY: Free Software for Teaching Neurophysiology of Neuronal Circuits. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 7 (1), A1-A8. 23492869.
- Guderian, P. (2007): Wirksamkeitsanalyse außerschulischer Lernorte. Der Einfluss mehrmaliger Besuche eines Schülerlabors auf die Entwicklung des Interesses an Physik. Dissertation. Humboldt-Universität, Berlin. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät I.
- Guderian, P.; Priemer, B. (2008): Interessenförderung durch Schülerlaborbesuche. Eine Zusammenfassung der Forschung in Deutschland. In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 2 (7), S. 27–36.
- Guenneq, J.-Y. Le; Vandier, C.; Bedfer, G. (2002): Simple experiments to understand the ionic origins and characteristics of the ventricular cardiac action potential. In: *Advances in Physiology Education* 26 (1-4), S. 185–194. DOI: 10.1152/advan.00061.2001.
- Guy, R. (2012): Overcoming misconceptions in neurophysiology learning: an approach using color-coded animations. In: *Advances in Physiology Education* 36 (3), S. 226–228. DOI: 10.1152/advan.00047.2012.
- Hattie, J. (2009): Visible learning. A synthesis of over 800 meta-analyses relating to achievement. London: Routledge. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10266302>.
- Haupt, O. J.; Domjahn, J.; Martin, U.; Skiebe-Corette, P.; Vorst, S.; Zehren, W.; Hempelmann, R. (2013): Schülerlabor – Begriffsschärfung und Kategorisierung. In: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht (MNU)* 66 (6), S. 324–330.
- Hayes, R. D.; Byrne, J. H.; Baxter, D. A. (2003): Neurosimulation: Tools and resources. In: M. A. Arbib (Hg.): *The handbook of brain theory and neural networks*. 2nd edition. Cambridge: MA: MIT Press, S. 776–780.
- Heitler, W. J. (1996): Neurosim. Letters to the editor. In: *Trends in Neuroscience* 19 (7), S. 279. DOI: 10.1016/S0166-2236(96)20033-5.
- Hessische Lehrkräfteakademie (2013): Evaluation / Auswertung - Akkreditierung-online. Online verfügbar unter <https://akkreditierung.hessen.de/106>, zuletzt geprüft am 14.03.2019.
- Hessisches Kultusministerium (o. J.): Bildungsstandards und Inhaltsfelder. Das neue Kerncurriculum für Hessen. Sekundarstufe I - Gymnasium, Biologie.
- Hessisches Kultusministerium (2016): Kerncurriculum gymnasiale Oberstufe. Biologie.
- Hidi, S.; Renninger, K. A. (2006): The four-phase model of interest development. In: *Educational Psychologist* 41 (2), S. 111–127. DOI: 10.1207/s15326985ep4102_4.

- Hodson, D. (1996): Practical work in school science: exploring some directions for change. In: *International Journal of Science Education* 18 (7), S. 755–760. DOI: 10.1080/0950069960180702.
- Hodson, D. (1998): Mini-Special Issue: Taking practical work beyond the laboratory. In: *International Journal of Science Education* 20 (6), S. 629–632. DOI: 10.1080/0950069980200601.
- Hodson, D.; Bencze, L. (1998): Becoming critical about practical work: changing views and changing practice through action research. In: *International Journal of Science Education* 20 (6), S. 683–694. DOI: 10.1080/0950069980200606.
- Hofstein, A.; Lunetta, V. N. (2004): The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century. In: *Science Education* 88 (1), S. 28–54. DOI: 10.1002/sce.10106.
- Holloway, S. R. (2013): Three colossal neurons: A new approach to an old classroom demonstration. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 12 (1), A1-A3. 24319384.
- Holstermann, N. (2009): Interesse von Schülerinnen und Schülern an biologischen Themen. Zur Bedeutung von hands-on Erfahrungen und emotionalem Erleben. Dissertation. Georg-August-Universität, Göttingen. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.
- Holstermann, N.; Grube, D.; Bögeholz, S. (2010): Hands-on activities and their influence on students' interest. In: *Research in Science Education* 40 (5), S. 743–757. DOI: 10.1007/s11165-009-9142-0.
- Hu, L.-t.; Bentler, P. M. (1999): Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. In: *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal* 6 (1), S. 1–55. DOI: 10.1080/10705519909540118.
- Hutcheson, G.; Sofroniou, N. (1999): The multivariate social scientist. London: Sage.
- Itzek-Greulich, H. (2014): Einbindung des Lernorts Schülerlabor in den naturwissenschaftlichen Unterricht. Empirische Untersuchung zu kognitiven und motivationalen Wirkungen eines naturwissenschaftlichen Lehr-Lernarrangements. Dissertation. Eberhard Karls Universität, Tübingen. Fakultät der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen.
- Itzek-Greulich, H.; Schwarzer, S. (2014): Potenziale und Wirkungen von Schülerlaboren. Vortragssymposium. In: Sascha Bernholt (Hg.): Heterogenität und Diversität - Vielfalt der Voraussetzungen im naturwissenschaftlichen Unterricht. Jahrestagung. Bremen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (35), S. 226–228.
- Itzek-Greulich, H.; Schwarzer, S. (2016): Schülerlabore für die MINT-Bildung – Bestand und Perspektiven. In: Christian M. (Hg.): Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis. Jahrestagung. Zürich. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (37), S. 512–515.
- Itzek-Greulich, H.; Vollmer, C. (2017): Emotional and motivational outcomes of lab work in the secondary intermediate track: The contribution of a science center outreach lab. In: *Journal of Research in Science Teaching* 54 (1), S. 3–28. DOI: 10.1002/tea.21334.
- Itzek-Greulich, H.; Vollmer, C. (2018): Quantitative Forschung zur Authentizität der Wissenschaftsvermittlung im Schülerlabor. Ein Diskussionsbeitrag. In: *Unterrichtswissenschaft* 46 (3), S. 321–326. DOI: 10.1007/s42010-018-0023-y.
- Johnson, B. R.; Wyttenbach, R.; Wayne, R.; Hoy, R. R. (2002): Action potentials in a giant algal cell: A comparative approach to mechanisms and evolution of excitability. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 1 (1), A23-A27. 23493389.
- Jonckheere, A. R. (1954): A distribution-free k-sample test against ordered alternatives. In: *Biometrika* 41 (1/2), S. 133–145. DOI: 10.2307/2333011.

- Jong, T. de; Linn, M. C.; Zacharia, Z. C. (2013): Physical and virtual laboratories in science and engineering education. In: *Science* 340 (6130), S. 305–308.
- Kaisarevic, S. N.; Andric, S. A.; Kostic, T. S. (2017): Teaching Animal Physiology: a 12-year experience transitioning from a classical to interactive approach with continual assessment and computer alternatives. In: *Advances in Physiology Education* 41 (3), S. 405–414. DOI: 10.1152/advan.00132.2016.
- Kaiser, H. F. (1974): An index of factorial simplicity. In: *Psychometrika* 39 (1), S. 31–36. DOI: 10.1007/BF02291575.
- Keen-Rhinehart, E.; Eisen, A.; Eaton, D.; McCormack, K. (2009): Interactive methods for teaching action potentials, an example of reaching innovation from neuroscience postdoctoral fellows in the fellowships in research and science teaching (FIRST) program. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 7 (2), A74-A79. 3592690.
- Kiliç, E.; Güler, Ç.; Çelik, H. E.; Tatli, C. (2015): Learning with interactive whiteboards: Determining the factors on promoting interactive whiteboards to students by Technology Acceptance Model. In: *Interactive Tech & Smart Ed* 12 (4), S. 285–297. DOI: 10.1108/ITSE-05-2015-0011.
- Killermann, W.; Hiering, P.; Starosta, B. (2009): Biologieunterricht heute. Eine moderne Fachdidaktik. 13., aktualisierte Aufl. Donauwörth: Auer (Didaktik).
- King, W. R.; He, J. (2006): A meta-analysis of the technology acceptance model. In: *Information & Management* 43 (6), S. 740–755. DOI: 10.1016/j.im.2006.05.003.
- Kladt, N.; Hanslik, U.; Heinzl, H.-G. (2010): Teaching basic neurophysiology using intact earthworms. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 9 (1), A20-A35. 23494516.
- Knight, A. (2007): Humane teaching methods prove efficacious within veterinary and other biomedical education. In: *Alternatives to Animal Testing and Experimentation* 14, S. 213–220.
- Korneck, F.; Heibel, T. (2002): Bewertung des naturwissenschaftlichen Unterrichts an allgemeinbildenden Schulen aus der Sicht von Auszubildenden zur/ zum Technischen Assistentin/en. In: *Didaktik der Physik* (Frühjahrstagung Leipzig).
- Krapp, A. (1992): Das Interessenkonstrukt. Bestimmungsmerkmale der Interessenhandlung und des individuellen Interesses aus der Sicht einer Person-Gegenstands-Konzeption. In: A. Krapp und M. Prenzel (Hg.): *Interesse, Lernen, Leistung. Neuere Ansätze einer pädagogisch-psychologischen Interessenforschung*. Münster: Aschendorff, S. 297–329.
- Krapp, A. (2003): Die Bedeutung der Lernmotivation für die Optimierung des schulischen Bildungssystems. In: *Politische Studien* 54 (Sonderheft 3), S. 91–105.
- Krapp, A. (2007): An educational–psychological conceptualisation of interest. In: *International Journal for Educational and Vocational Guidance* 7 (1), S. 5–21. DOI: 10.1007/s10775-007-9113-9.
- Krapp, A.; Prenzel, M. (2011): Research on interest in science: Theories, methods, and findings. In: *International Journal of Science Education* 33 (1), S. 27–50. DOI: 10.1080/09500693.2010.518645.
- Krapp, A.; Schiefele, U.; Schreyer, I. (1993): Metaanalyse des Zusammenhangs von Interesse und schulischer Leistung. In: *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie* 10 (2), S. 120–148.
- Krontiris-Litowitz, J. (2003): Using manipulatives to improve learning in the undergraduate neurophysiology curriculum. In: *Advances in Physiology Education* 27 (1-4), S. 109–119. DOI: 10.1152/advan.00042.2002.
- Kruskal, W. H.; Wallis, W. A. (1952): Use of ranks in one-criterion variance analysis. In: *Journal of the American Statistical* 47 (260), S. 583–621. DOI: 10.2307/2280779.

- Kurbel, S. (2003): Simplified interpretation of the pacemaker potential as a tool for teaching membrane potentials. In: *Advances in Physiology Education* 27 (1-4), S. 159–161. DOI: 10.1152/advan.00054.2002.
- Landa-Jiménez, M. A.; González-Gaspar, P.; Pérez-Estudillo, C.; López-Meraz, M. L.; Morgado-Valle, C.; Beltran-Parrazal, L. (2016): Open-box muscle-computer interface: Introduction to human-computer interactions in bioengineering, physiology, and neuroscience courses. In: *Advances in Physiology Education* 40 (1), S. 119–122. DOI: 10.1152/advan.00009.2015.
- Lee, M. K. O.; Cheung, C. M. K.; Chen, Z. (2005): Acceptance of internet-based learning medium: The role of extrinsic and intrinsic motivation. In: *Information & Management* 42 (8), S. 1095–1104. DOI: 10.1016/j.im.2003.10.007.
- Legrís, P.; Ingham, J.; Collette, P. (2003): Why do people use information technology? A critical review of the technology acceptance model. In: *Information & Management* 40 (3), S. 191–204. DOI: 10.1016/S0378-7206(01)00143-4.
- LernortLabor (2019): Was sind eigentlich Schülerlabore? Bundesverband der Schülerlabore e.V. Online verfügbar unter <https://www.lernortlabor.de/ueber-schuelerlabore/schuelerlabore>, zuletzt geprüft am 06.10.2019.
- LernortLabor-Atlas (2019): Schülerlabor-Atlas. Bundesverband der Schülerlabore e.V. Online verfügbar unter <https://www.schuelerlabor-atlas.de/>, zuletzt aktualisiert am 10-2019, zuletzt geprüft am 16.10.2019.
- Levene, H. (1960): Robust tests for equality of variances. In: I. Olkin, S. G. Ghurye, W. Hoeffding, W. G. Madow und H. B. Mann (Hg.): *Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling*. Stanford: CA: Stanford University Press, S. 278–292.
- Lewis, D. I. (2014): The pedagogical benefits and pitfalls of virtual tools for teaching and learning laboratory practices in the biological sciences. Heslington, York, UK: The Higher Education Academy. Online verfügbar unter https://www.heacademy.ac.uk/system/files/resources/the_pedagogical_benefits_and_pitfalls_of_virtual_tools_for_teaching_and_learning_laboratory_practices_in_the_biological_sciences.pdf, zuletzt geprüft am 16.08.2019.
- Liu, I.-F.; Chen, M. C.; Sun, Y. S.; Wible, D.; Kuo, C.-H. (2010): Extending the TAM model to explore the factors that affect Intention to Use an Online Learning Community. In: *Computers & Education* 54 (2), S. 600–610. DOI: 10.1016/j.compedu.2009.09.009.
- Ma, J.; Nickerson, J. V. (2006): Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review. In: *ACM Computing Surveys* 38 (3), S. 1–24. DOI: 10.1145/1132960.1132961.
- MacNabb, C.; Schmitt, L.; Michlin, M.; Harris, I.; Thomas, L.; Chittendon, D. et al. (2006): Neuroscience in middle schools: A professional development and resource program that models inquiry-based strategies and engages teachers in classroom implementation. In: *CBE life sciences education* 5 (2), S. 144–157. DOI: 10.1187/cbe.05-08-0109.
- Manalis, R. S.; Hastings, L. (1974): Electrical gradients across an ion-exchange membrane in student's artificial cell. In: *Journal of Applied Physiology* 36 (6), S. 769–770. DOI: 10.1152/jappl.1974.36.6.769.
- Mann, H. B.; Whitney, D. R. (1947): On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. In: *Annals of Mathematical Statistics* 18 (1), S. 50–60. DOI: 10.1214/aoms/1177730491.
- Mar Quiroga, M. del; Price, N. S. C. (2016): Simulated in vivo electrophysiology experiments provide previously inaccessible insights into visual physiology. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 15 (1), A11-A17. 27980465.

- Marakas, G. M.; Yi, M. Y.; Johnson, R. D. (1998): The multilevel and multifaceted character of computer self-efficacy: Toward clarification of the construct and an integrative framework for research. In: *Information Systems Research* 9 (2), S. 126–163. DOI: 10.1287/isre.9.2.126.
- Marzullo, T. C.; Gage, G. J. (2012): The SpikerBox: A low cost, open-source bioamplifier for increasing public participation in neuroscience inquiry. In: *PloS one* 7 (3), e30837. DOI: 10.1371/journal.pone.0030837.
- McGrath, P.; Kucera, R.; Smith, W. (2003): Computer simulation of introductory neurophysiology. In: *Advances in Physiology Education* 27 (3), S. 120–129. DOI: 10.1152/advan.00055.2002.
- Meir, E. (2004): SimBiotic software short-shots. In: *CAL-laborate* 11 (1), S. 18–21.
- Meraner, R. (2014): Starke Lerneffekte. In: *Info. Informationsschrift für Kindergarten und Schule in Südtirol*, 02/2014, S. 36–37. Online verfügbar unter www.schule.suedtirol.it/lasis/documents/info/2013_14/INFO_02_2014.pdf, zuletzt geprüft am 14.03.2019.
- Meuth, P.; Meuth, S. G.; Jacobi, D.; Broicher, T.; Pape, H.-C.; Budde, T. (2005): Get the rhythm: Modeling neuronal activity. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 4 (1), A1-11. 23493337.
- Michael, J. (2006): Where's the evidence that active learning works? In: *Advances in Physiology Education* 30 (4), S. 159–167. DOI: 10.1152/advan.00053.2006.
- Mierwald, M.; Lehmann, T.; Brauch, N. (2018): Zur Veränderung epistemologischer Überzeugungen im Schülerlabor: Authentizität von Lernmaterial als Chance der Entwicklung einer wissenschaftlich angemessenen Überzeugungshaltung im Fach Geschichte? In: *Unterrichtswissenschaft* 46 (3), S. 279–297. DOI: 10.1007/s42010-018-0019-7.
- Milanick, M. (2009): Changes of membrane potential demonstrated by changes in solution color. In: *Advances in Physiology Education* 33 (3), S. 230. DOI: 10.1152/advan.00052.2009.
- Molitor, S. C.; Tong, M.; Vora, D. (2006): MATLAB-based simulation of whole-cell and single-channel currents. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 4 (2), A74-A82. 23493427.
- Montagna, E.; de Azevedo, Adriana M. S.; Romano, C.; Ranvaud, R. (2010): What is transmitted in "synaptic transmission"? In: *Advances in Physiology Education* 34 (2), S. 115–116. DOI: 10.1152/advan.00006.2010.
- Moore, J. W.; Stuart, A. E. (2015): *Neurons in Action 2. Tutorials and simulations using Neuron, Version 2.* Sunderland: Sinauer Associates Inc.
- Moran, W. M.; Denton, J.; Wilson, K.; Williams, M. and Runge, S. W. (1999): A simple, inexpensive method for teaching how membrane potentials are generated. In: *American Journal of Physiology* 277 (6), S. 51–59. DOI: 10.1152/advances.1999.277.6.S51.
- Müller-Böling, D.; Müller, M. (1986): *Akzeptanzfaktoren der Bürokommunikation.* München, Wien: Oldenbourg (Fachberichte und Referate, 17).
- Neves, B.-H. S.; Altermann, C.; Gonçalves, R.; Lara, M. V.; Mello-Carpes, P. B. (2017): Home-based vs. laboratory-based practical activities in the learning of human physiology: The perception of students. In: *Advances in Physiology Education* 41 (1), S. 89–93. DOI: 10.1152/advan.00018.2016.
- Newman, M. H.; Newman, E. A. (2013): MetaNeuron: A free neuron simulation program for teaching cellular neurophysiology. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 12 (1), A11-A17. 3852865.

- Nickolaus, R.; Mokhonko, S. (2016): Nachhaltige Effekte in Schülerlaboren? In: Christian M. (Hg.): Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis. Jahrestagung. Zürich. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (37), S. 516–519.
- Odenweller, C. M.; Hsu, C. T.; Sipe, E.; Layshock, J. P.; Varyani, S.; Rosian, R. L.; DiCarlo, S. E. (1997): Laboratory exercise using 'virtual rats' to teach endocrine Physiology. In: *Advances in Physiology Education* 273 (6), S. 24–40. DOI: 10.1152/advances.1997.273.6.S24.
- OECD (2002): Understanding the Brain -Towards a New Learning Science. Paris: OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). Online verfügbar unter <http://www.oecd.org/education/ceri/31706603.pdf>, zuletzt geprüft am 31.07.2019.
- Park, S. Y. (2009): An analysis of the technology acceptance model in understanding university students' behavioral intention to use e-learning. In: *Educational Technology & Society* 12 (3), S. 150–162.
- Pawek, C. (2009): Schülerlabore als interessefördernde außerschulische Lernumgebungen für Schülerinnen und Schüler aus der Mittel- und Oberstufe. Dissertation. Christian-Albrechts-Universität, Kiel. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.
- Pawek, C. (2011): Schülerlabore als nachhaltig das Interesse fördernde ausserschulische Lernumgebungen. In: Brovelli, D., K. Fuchs, R. von Niederhäusern und A. Rempfler (Hg.): Kompetenzentwicklung an Ausserschulischen Lernorten. 2. Tagung Außerschulische Lernorte. PHZ Luzern. Berlin-Münster-Wien-Zürich-London: LIT Verlag (Ausserschulische Lernorte - Beiträge zur Didaktik, 2), S. 69–94.
- Pintrich, P. R. (2003): A motivational science perspective on the role of student motivation in learning and teaching contexts. In: *Journal of Educational Psychology* 95 (4), S. 667–686. DOI: 10.1037/0022-0663.95.4.667.
- Plenter, I. (2004): Vorhersage von Fähigkeitsselbstkonzepten: Zur Bedeutung von Einzel- und Klassenleistung. Diplomarbeit. Justus-Liebig-Universität, Gießen. Psychologie und Sportwissenschaften.
- Prenzel, M. (1988): Die Wirkungsweise von Interesse. Ein pädagogisches Erklärungsmodell. Opladen: Westdeutscher Verlag (Beiträge zur psychologischen Forschung, 13).
- Prenzel, M. (Hg.) (2008): PISA 2006 in Deutschland. Die Kompetenzen der Jugendlichen im dritten Ländervergleich. Deutsches PISA-Konsortium. Münster: Waxmann.
- Priemer, B.; Kirchner, S.; Guderian, P. (2007): Ein Vergleich des Interesses von Schülern an Biologie, Chemie, Physik und Mathematik nach Besuchen in einem Schülerlabor. In: V. Nordmeier (Hg.): Didaktik der Physik. Beiträge der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Regensburg.
- Priemer, B.; Pawek, C. (2014): Out-of-school STEM learning in Germany: Can we catch and hold students' interest? Paper presented at the NARST 2014 annual conference.
- Procopio, J. (1994): Hydraulic analogs as teaching tools for bioelectric potentials. In: *American Journal of Physiology* 267, S. 65–76. DOI: 10.1152/advances.1994.267.6.S65.
- Ramos, R. L.; Moiseff, A.; Brumberg, J. C. (2007): Utility and versatility of extracellular recordings from the cockroach for neurophysiological instruction and demonstration. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 5 (2), A28-A34. 23494074.
- Razali, N. M.; Wah, Y. B. (2011): Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. In: *Journal of Statistical Modeling and Analytics* 2 (1), S. 21–33.
- Reinke-Nobbe, E. (Hg.) (2007): Insekten: Beobachten - Analysieren - Schlussfolgern. Kompetenzförderung durch praktisches Arbeiten mit lebenden Tieren. Zentrum für Schulbiologie und Umwelterziehung. Hamburg: Landesinstitut für Lehrerbildung und Schulentwicklung.

- Renner, J. W.; Abraham, M. R.; Birnie, H. H. (1985): Secondary school students' beliefs about the physics laboratory. In: *Science Education* 69 (5), S. 649–663. DOI: 10.1002/sce.3730690507.
- Revest, P. (1995): Neurosim for Windows. In: *Trends in Neuroscience* 18 (12), S. 556. DOI: 10.1016/0166-2236(95)98378-C.
- Ribeiro-Filho, H. V.; Brito, T. S.; Lima, F. J. B.; Pinho, J. P. M.; Sousa, D. F.; Silva, M. T. B. et al. (2012): Talking about bioelectrical potentials using rings of the mesenteric artery without glass micropipettes. In: *Advances in Physiology Education* 36 (4), S. 336–344. DOI: 10.1152/advan.00050.2012.
- Richardson, D. (2011): Is virtual reality a useful tool in the teaching of physiology? In: *Advances in Physiology Education* 35 (2), S. 117–119. DOI: 10.1152/advan.00002.2011.
- Ringelband, Ute; Prenzel, Manfred; Euler, M. (Hg.) (2001): Lernort Labor. Initiativen zur naturwissenschaftlichen Bildung zwischen Schule, Forschung und Wirtschaft. Kiel: IPN (IPN-Materialien).
- Ritter, N. L. (2017): Technology acceptance model of online learning management systems in higher education: A meta-analytic structural equation model. In: *International Journal of Learning Management Systems* 5 (1), S. 1–15. DOI: 10.18576/ijlms/050101.
- Rochelle, A. B. F. A.; Pasian, S. R.; Silva, R. H. A.; Rocha, M. J. A. (2016): Perceptions of undergraduate students on the use of animals in practical classes. In: *Advances in Physiology Education* 40 (3), S. 422–424. DOI: 10.1152/advan.00019.2016.
- Rodriguez-Falces, J. (2013): A novel approach to teach the generation of bioelectrical potentials from a descriptive and quantitative perspective. In: *Advances in Physiology Education* 37 (4), S. 327–336. DOI: 10.1152/advan.00064.2013.
- Rodriguez-Falces, J. (2015): Understanding the electrical behavior of the action potential in terms of elementary electrical sources. In: *Advances in Physiology Education* 39 (1), S. 15–26. DOI: 10.1152/advan.00130.2014.
- Rosenthal, R. (1991): Meta-analytic procedures for social research. Rev. ed., 1. printing. Newbury Park: Sage (Applied social research methods series, 6).
- Ryan, R. M.; Deci, E. L. (2000a): Intrinsic and Extrinsic Motivations: Classic Definitions and New Directions. In: *Contemporary Educational Psychology* 25 (1), S. 54–67. DOI: 10.1006/ceps.1999.1020.
- Ryan, R. M.; Deci, E. L. (2000b): Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. In: *American Psychologist* 55 (1), S. 68–78. DOI: 10.1037//0003-066X.55.1.68.
- Sawyer, R. T. (1986): Leech Biology and Behaviour. Anatomy, Physiology, and Behaviour. 3 Bände. Oxford: Oxford University Press / Clarendon Press (1).
- Scharfenberg, F.-J. (2005): Experimenteller Biologieunterricht zu Aspekten der Gentechnik im Lernort Labor: empirische Untersuchung zu Akzeptanz, Wissenserwerb und Interesse. Am Beispiel des Demonstrationslabors Bio-/Gentechnik der Universität Bayreuth mit Schülern aus dem Biologie-Leistungskurs des Gymnasiums. Inaugural-Dissertation. Universität Bayreuth, Bayreuth. Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften.
- Schecker, H. (2014): Überprüfung der Konsistenz von Itemgruppen mit Cronbachs alpha. In: D. Krüger, I. Parchmann und H. Schecker (Hg.): Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum (Springer Link: Bücher).

- Scherer, R.; Siddiq, F.; Tondeur, J. (2019): The technology acceptance model (TAM): A meta-analytic structural equation modeling approach to explaining teachers' adoption of digital technology in education. In: *Computers & Education* 128, S. 13–35. DOI: 10.1016/j.compedu.2018.09.009.
- Schettino, L. F. (2014): NeuroLab: A set of graphical computer simulations to support neuroscience instruction at the high school and undergraduate level. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 12 (2), A123-A129. 3970994.
- Schiefele, U.; Krapp, A. (1996): Topic interest and free recall of expository text. In: *Learning and Individual Differences* 8 (2), S. 141–160. DOI: 10.1016/S1041-6080(96)90030-8.
- Schiepe-Tiska, A.; Schmidtner, S.; Müller, K.; Heine, J.-H.; Neumann, K.; Lüdtke, O. (2016): Naturwissenschaftlicher Unterricht in Deutschland in PISA 2015 im internationalen Vergleich. In: K. Reiss, C. Sälzer, A. Schiepe-Tiska, E. Klieme und O. Köller (Hg.): PISA 2015. Eine Studie zwischen Kontinuität und Innovation. Münster, New York: Waxmann, 133-175.
- Schmitt, N. (1996): Uses and abuses of coefficient alpha. In: *Psychological Assessment* 8 (4), S. 350–353. DOI: 10.1037/1040-3590.8.4.350.
- Schwab, A.; Kersting, U.; Oberleithner, H. and Silbernagl, S. (1995): *Xenopus laevis* oocyte: Using living cells to teach the theory of cell membrane potential. In: *American Journal of Physiology* 268 (6), S. 26–31.
- Sekretariat der Kultusministerkonferenz (Hg.) (2017): Bildung in der digitalen Welt. Strategie der Kultusministerkonferenz. Online verfügbar unter https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2018/Digitalstrategie_2017_mit_Weiterbildung.pdf, zuletzt geprüft am 08.10.2019.
- Sekretariat der Kultusministerkonferenz (Hg.) (2019): Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht. (RiSU) Empfehlung der Kultusministerkonferenz. Online verfügbar unter https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/1994/1994_09_09-Sicherheit-im-Unterricht.pdf, zuletzt geprüft am 08.10.2019.
- Servicestelle Lehrevaluation (Hg.) (2015): MoGLi-K. Modulares Gießener verhaltensbasiertes Lehrveranstaltungsrückmeldungsinstrument, Kernfragebogen. Justus-Liebig-Universität Gießen. Online verfügbar unter <http://www.uni-giessen.de/org/admin/stab/stl/servicestelle/Downloadbereich/mogli-k>, zuletzt geprüft am 14.03.2019.
- Shannon, K. M.; Gage, G. J.; Jankovic, A.; Wilson, W. J.; Marzullo, T. C. (2014): Portable conduction velocity experiments using earthworms for the college and high school neuroscience teaching laboratory. In: *Advances in Physiology Education* 38 (1), S. 62–70. DOI: 10.1152/advan.00088.2013.
- Sheorey, T.; Gupta, V. K. (2011): Effective virtual laboratory content generation and accessibility for enhanced skill development through ICT. In: *Proceedings of Computer Science and Information* 12, S. 33–39.
- Shlyonsky, V. (2013): Ion permeability of artificial membranes evaluated by diffusion potential and electrical resistance measurements. In: *Advances in Physiology Education* 37 (4), S. 392–400. DOI: 10.1152/advan.00068.2013.
- Silverthorn, D. U. (2002): Uncovering misconceptions about the resting membrane potential. In: *Advances in Physiology Education* 26 (1-4), S. 69–71. DOI: 10.1152/advan.00012.2002.
- Sircar, S. S. (1994): A hydrostatic model of membrane potential. In: *American Journal of Physiology* 267 (6), S. 77–80. DOI: 10.1152/advances.1994.267.6.S77.

- Sircar, S. S.; Tandon, O. P. (1996): Teaching nerve conduction to undergraduates: The 'traveling flame' analogy revisited. In: *Advances in Physiology Education* 15 (1), S. 78–80. DOI: 10.1152/advances.1996.270.6.S78.
- Slominski, T. N.; Momsen, J. L.; Montplaisir, L. M. (2017): Drawing on student knowledge of neuroanatomy and neurophysiology. In: *Advances in Physiology Education* 41 (2), S. 212–221. DOI: 10.1152/advan.00129.2016.
- Spörhase-Eichmann, U.; Ruppert, W. (Hg.) (2004): *Biologie-Didaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II*. 1. Aufl. Berlin: Cornelsen Scriptor.
- Steffens, U.; Höfer, D. (2014): *Die Hattie-Studie. Forschungsbilanz und Handlungsperspektiven*. Wien.
- Stevens, J. (2002): *Applied multivariate statistics for the social sciences*. 4th ed. Mahwah, N.J.: L. Erlbaum.
- Stuart, A. E. (2009): Teaching neurophysiology to undergraduates using *Neurons in Action*. In: *The Journal of Undergraduate Neuroscience Education* 8 (1), A32–A36. 23493486.
- Šumak, B.; Heričko, M.; Pušnik, M. (2011): A meta-analysis of e-learning technology acceptance: The role of user types and e-learning technology types. In: *Computers in Human Behavior* 27 (6), S. 2067–2077. DOI: 10.1016/j.chb.2011.08.005.
- Taherdoost, H. (2018): A review of technology acceptance and adoption models and theories. In: *Procedia Manufacturing* 22, S. 960–967. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.03.137.
- Tchaptchet, A.; Postnova, S.; Finke, C.; Schneider, H.; Huber, M. T.; Braun, H. A. (2013): Modeling neuronal activity in relation to experimental voltage-/patch-clamp recordings. In: *Brain Research* 1536, S. 159–167. DOI: 10.1016/j.brainres.2013.06.029.
- Terpstra, T. J. (1952): The asymptotic normality and consistency of Kendall's test against trend, when ties are present in one ranking. In: *Indagationes Mathematicae* 14 (3), S. 327–333. DOI: 10.1016/s1385-7258%2852%2950043-x.
- Thurman, C. L. (1995): Resting membrane potentials: A student test of alternate hypotheses. In: *American Journal of Physiology* 269 (6), S. 37–41.
- Todt, E. (1978): *Das Interesse. Empirische Untersuchungen zu einem Motivationskonzept*. Bern: Huber.
- Venkatesh, V. (2000): Determinants of perceived ease of use: Integrating control, intrinsic motivation, and emotion into the technology acceptance model. In: *Information Systems Research* 11 (4), S. 342–365.
- Venkatesh, V.; Bala, H. (2008): Technology acceptance model 3 and a research agenda on interventions. In: *Decision Sciences* 39 (2), S. 273–315. DOI: 10.1111/j.1540-5915.2008.00192.x.
- Venkatesh, V.; Davis, F. D. (2000): A theoretical extension of the technology acceptance model: Four longitudinal field studies. In: *Management Science* 46 (2), S. 186–204. DOI: 10.1287/mnsc.46.2.186.11926.
- Venkatesh, V.; Morris, M. G.; Davis, G. B.; Davis, F. D. (2003): User acceptance of information technology: Toward a unified view. In: *MIS Quarterly* 27 (3), S. 425–478. DOI: 10.2307/30036540.
- Venkatesh, V.; Speier, C.; Morris, M. G. (2002): User acceptance enablers in individual decision making about technology: Toward an integrated model. In: *Decision Sciences* 33 (2), S. 297–316. DOI: 10.1111/j.1540-5915.2002.tb01646.x.
- Venkatesh, V.; Thong, J. Y. L.; Xu, X. (2012): Consumer acceptance and use of information technology: Extending the unified theory of acceptance and use of technology. In: *MIS Quarterly* 36 (1), S. 157–178. DOI: 10.2307/41410412.

- Visible Learning Plus (2018): The Research of John Hattie | Visible Learning. Unter Mitarbeit von Corwin company. Online verfügbar unter <https://www.visiblelearningplus.com/content/research-john-hattie>, zuletzt geprüft am 22.03.2019.
- Vogt, H.; Upmeier zu Belzen, A.; Schröer, T.; Hoek, I. (1999): Unterrichtliche Aspekte im Fach Biologie, durch die Unterricht aus Schülersicht als interessanter erachtet wird. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 5 (3), S. 75–85.
- Wang, R.; Liu, C.; Ma, T. (2018): Evaluation of a virtual neurophysiology laboratory as a new pedagogical tool for medical undergraduate students in China. In: *Advances in Physiology Education* 42 (4), S. 704–710. DOI: 10.1152/advan.00088.2018.
- Wentorf, W.; Höffler, T. N.; Parchmann, I. (2015): Schülerkonzepte über das Tätigkeitsspektrum von Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftlern: Vorstellungen, korrespondierende Interessen und Selbstwirksamkeitserwartungen. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 21 (1), S. 207–222. DOI: 10.1007/s40573-015-0035-7.
- Wigfield, A.; Eccles, J. S. (2000): Expectancy-value theory of achievement motivation. In: *Contemporary Educational Psychology* 25 (1), S. 68–81. DOI: 10.1006/ceps.1999.1015.
- Wilcoxon, F. (1945): Individual comparisons by ranking methods. In: *Biometrics Bulletin* 1 (6), S. 80–83. DOI: 10.2307/3001968.
- Winter, J. C. F. de; Dodou, D. (2010): Five-point likert items: T Test versus Mann-Whitney-Wilcoxon. In: *Practical Assessment, Research & Evaluation* 15 (11), S. 1–16.
- Wright, S. H. (2004): Generation of resting membrane potential. In: *Advances in Physiology Education* 28 (4), S. 139–142. DOI: 10.1152/advan.00029.2004.
- Yi, M. Y.; Hwang, Y. (2003): Predicting the use of web-based information systems: Self-efficacy, enjoyment, learning goal orientation, and the technology acceptance model. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 59 (4), S. 431–449. DOI: 10.1016/S1071-5819(03)00114-9.
- Yoshida, S. (2001): Simple techniques suitable for student use to record action potentials from the frog heart. In: *Advances in Physiology Education* 25 (3), 176–186. DOI: 10.1152/advances.2001.25.3.176.
- Zehren, W. (2009): Forschendes Experimentieren im Schülerlabor. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken. Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät III.
- Zimmermann, S.; Dierkes, P. (2019): Pore auf und wieder zu: Liganden-aktivierte Ionenkanäle im simulierten Forschungsexperiment. In: *Unterricht Biologie - Friedrich Verlag* 441, S. 24–29.

Anhang

A Sinnesphysiologie und Neurobiologie an außerschulischen Lernorten in Deutschland

(Stand: Juli 2019)

1) BeLL Bio – Bergisches Lehr-Lern-Labor Biologie

Bergische Universität Wuppertal – Wuppertal (Nordrhein-Westfalen)

<https://www.bellbio.uni-wuppertal.de/>

Zielgruppe: Sekundarstufe I / II

Themen:

„Das Gehirn - Ein lebendes Netzwerk" (Sek II)

- Klassische und moderne neurophysiologische / medizinische Methoden mit Schwerpunkt Humanphysiologie
- Aufnahmen und statistische Auswertung vom EEG, Färbemethoden von histologischen Präparaten (Quetschpräparat Pyramidenzellen)
- Zytologische, anatomische und bildgebende Verfahren
- Versuche zum motorischem Lernen: Cupstacking; EEG; Anatomie (Präparation des Schweinehirns), Pyramidenzellen im natürlichen Gewebe und in selbst erstellten mikroskopischen Präparaten

Neurobiologie (8. / 9. Klasse) - *Medial, Bilingual „Brain matter(s)“*

- Menschliches Nervensystem (Schwerpunkt Gehirn und Rückenmark), Aufbau und Funktion von Neuronen, Informationsübertragung an den Synapsen, Reaktionszeiten und Reflexe, Grundlagen für Reizverarbeitung
- Präparation Schweinehirn
- Quetschpräparat Pyramidenzellen der grauen Substanz eines Schweine-Cortex, Methyleneblau-Färbung
- Knie-Sehnen Reflex mit Reaktionszeit-Messung
- Bau eines Neuronen-Modells (3D Modell aus Knete)

2) Biologie-hautnah

Universität Bielefeld – Bielefeld (Nordrhein-Westfalen)

www.biologie-hautnah.de

Zielgruppe: Sekundarstufe I / II

Themen:

Sportbiologie (E, Q1, Q2)

- Ernährung und Fitness, Herz-Kreislauf-System, Anatomie, Pulsmessungen, Lungenvolumen, Sauerstoffsättigung
- Neurale Steuerung der Muskulatur (im Aufbau)

Biomedizin (9. Klasse – Q2)

- Herz-Kreislauf, Pathologie, Herzdruckmassage, Defibrillator

Verhalten (7.-10. Klasse)

- Operante und klassische Konditionierung; neuronale Aspekte von Verhalten; Arbeit mit lebenden Tieren; Hypothesenbildung und -prüfung in eigens konzipierten Versuchsaufbauten

3) Forscherfabrik Schorndorf

Schorndorf (Baden-Württemberg)

<https://www.forscherfabrik-schorndorf.de/>

Zielgruppe: 1. - 6. Klasse

Themen: Offenes Konzept inklusive Kursbuchungen zur **Wahrnehmung**

4) Gläsernes Labor

Buch GmbH / Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin (MDC) - Berlin

<https://www.glaesernes-labor.de/>

Zielgruppe: Sek I und II

Themen Neurobiologie:

- **Nervenzellen und Gliazellen (ab Klasse 11)**
 - o Neurodegenerative Erkrankungen, EMG Messungen am Arm, Potenzialmessungen an Membranen, Reflexbogen, Aktionspotenziale am Regenwurm, Elektrooculographie, Lernverhalten

Themen Physiologie:

- **Experimente mit dem Herzen (ab Klasse 7)**

- Präparation Hühnerherz, Arterien und Venen unterm Mikroskop, Herz eines Wasserflohs, Vergleich EMG und EKG, Blutdruck und Puls

5) JuLab

Forschungszentrum Jülich GmbH – Jülich (Nordrhein-Westfalen)

http://www.fz-juelich.de/julab/DE/Home/home_node.html

Zielgruppe: 7. – 8. Klasse

Themen:

Gehirn – Projekt MINTMinds! (Besuch mehrfach)

- Gewebe-Dünnschnitte, mikroskopische Methoden (PLI) und Simulationen am Supercomputer (virtueller Gehirnatlas), Tomografiemethoden (MRT, PET) und neuropsychologische Tests

6) Lernlabor liv/fe BioLab

Technische Universität – Darmstadt (Hessen)

<https://www.biolernlabtudarmstadt.de/>

Zielgruppe: Sekundarstufe I / II

Themen Neurobiologie (Q3):

- **Nervenzellen**
 - Strukturelle und funktionelle Organisation von Nervenzellen am Modellsystem der Ganglien eines Blutegels, Vital- und Fluoreszenzfärbungen, Fluoreszenzmikroskopie
- **Membranpotenziale**
 - Elektrophysiologische Messungen an Pflanzenzellen (Internodialzellen der Armleuchteralge / Fangblätter der Venusfliegenfalle), Herstellung Messelektroden

Themen Physiologie (9. – 10. Klasse):

- **Herzkreislaufsystem**
 - Struktur und Funktion des Herzens, Präparation Lamm-Herz, EKG-Messungen, pathologische EKG-Spuren
- **Sinnessysteme**
 - Visuelles, auditives, haptisches, olfaktorisches und gustatorisches System

7) MaxLab

Max-Planck-Institut – Martinsried (Bayern)

<https://www.neuro.mpg.de/maxlab>

Zielgruppe: Modifizierbar von Klasse 7 – 13

Themen Oberstufe:

- **Elektrophysiologie:** Aktionspotenzial Messung am Regenwurm und Messung eines Reflexes
- **Lernen und Gedächtnis:** Lernvermögen von Fruchtfliegen zum Geruchssinn (Verhaltensexperiment)

Themen Sek. I:

- Je nach Alter ohne Regenwurm (s. o.)
- Je nach Alter ohne Fliegen (s. o.)
- **Wahrnehmung:** Experimente zur Umkehrbrille und Sinnesorganen

8) Nationalpark-Zentrum Multimar Wattforum

Tönning (Schleswig-Holstein)

<https://multimar-wattforum.de/>

Zielgruppe: Ohne Beschränkung

Themen: **Verhalten:** Verhaltensuntersuchungen bei unterschiedlichen Nordseetieren

9) NatLab – Mitmach und Experimentierlabor für SchülerInnen

Frei Universität Berlin - Berlin

www.natlab.de

Zielgruppe: ab Klasse 10

Themen:

Neurobiologie

- **Klassische Konditionierung**
 - Duft-Konditionierung mit Larven der Fruchtfliege *Drosophila melanogaster*
- **Aktionspotenziale**
 - Extrazelluläre Ableitung sensorischer Neuronen der Schabe (Alles-oder-Nichts-Gesetz, Adaptation, Frequenzkodierung)
- **Neuronale Verarbeitung und Sehen**
 - Ganglienzellen der Katzen-Retina, Simulation des rezeptiven Feldes durch einen Retina-Chip, Adaptation und Frequenzkodierung

10) OpenSea

Alfred-Wegener-Institut – Helgoland (Schleswig-Holstein)

<https://www.awi.de/arbeiten-lernen/aus-der-schule/ins-schuelerlabor/opensea-helgoland.html>

Themen: Diverse Verhaltensexperimente und Beobachtungen

11) Projektbüro Biotechnologie

Berufskolleg Olsberg des HSK – Olsberg (Nordrhein-Westfalen)

<https://www.stark-lippstadt.de/kursangebot-veranstaltungen/projektbuero-biotechnologie/>

Zielgruppe: Sek II

Themen:

Neuro- und Humanphysiologie

- **Funktionsprinzipien von Nervenzellen**
 - Computergestützte Messungen von Potenzialen an Nerven- und Muskelzellen beim Regenwurm und beim Menschen, Schwellenspannung, Alles-oder-Nichts-Gesetz, Refraktärzeit, Bidirektionalität (elektrische Synapsen), Ableitungen der Leitungsgeschwindigkeit von Regenwurm Riesenfasern und Ulnarnerv des Menschen (EMG)
- **Funktionsprinzipien von Muskeln**
 - Skelettmuskulatur und das Herz-Kreislauf-System, Muskelkontraktion (EMG), Ermüdung, Tonus, Messungen von EKG sowie Puls- und Atemfrequenz, Blutdruck, Atemvolumen

12) Schülerlabor Neurowissenschaften

Eberhard Karis Universität Tübingen – Tübingen (Baden-Württemberg)

<http://www.neuroschool-tuebingen-schuelerlabor.de/>

Zielgruppe: Sekundarstufe II

Themen: Die Klassen wählen bis zu 6 Versuche aus für ihren Besuch

- **Anatomie und Histologie des Nervensystems**
 - Präparation eines Schafhirns und Mikroskopie von verschiedenen pathologischen Hirnschnitten (Maus) und anderen Säugetieren
- **Elektrische Aktivität von Nerven- und Muskelzellen**
 - Intrazelluläre Ableitungen von Nervenzellen eines Ganglions (Schnecke)
 - Testmessung mit künstlicher Zelle, Präparation Ganglion, Herstellung Mikroelektroden, Messung Ruhe- und Membranpotenzial, Strompulsprotokolle, LTP
 - Extrazelluläre Ableitungen von Aktionspotenzialen (Schabe)

- Präparation Schabenbein, extrazelluläre Ableitungen von Summenaktionspotenzialen, Antwortverhalten von Mechanorezeptoren, Muskelkontraktion durch elektrischen Stimulus
- Elektrische Fische
 - Entladungsmuster und –frequenzen, Feldstärke, Verhalten, Geschlechtsbestimmung, künstliches elektrisches Feld
- **Neurobiologie der Sinnessysteme**
 - Psychophysik des Sehens
 - Räumliches Auflösungsvermögen (Gesichtsfeld, Grenzen der visuellen Wahrnehmung), Bewegungssehen (zeitliches Auflösungsvermögen, Geschwindigkeitsillusionen), gerichtete Aufmerksamkeit (Veränderungsblindheit, Aufmerksamkeits-Lidschluss), Mathematik (Wahrnehmungsgrößen, Mengen Illusionen), Täuschungen (Ebbinghaus, Müller-Lyer Illusion)
 - Psychophysik des Hörens
 - Hörschwellenkurve, binaurale Laufzeitunterschiede, Weber-Fechner Gesetz
- **Neurobiologie motorischer Systeme**
 - Elektromyographie
 - Aktionspotenziale von motorischen Einheiten, EMG Fingermuskulatur, isotonische Kontraktion, isometrische Kontraktionen, Entladungsfrequenzen, quantitative Auswertung EMG, monosynaptische Reflexe, EMG Mimik, optional: EKG Messung in Ruhe und nach Belastung
 - Blickbewegungen
 - Eyetrackeraufzeichnungen, Fixationen, Blicksprünge, Folgebewegungen
- **Theoretische Neurobiologie**
 - Digitale Bildverarbeitung
 - Computermodell der rezeptiven Felder von Nervenzelle in der Sehrinde, Einführung in Matlab, Matrizen, Bewegungsdetektoren
 - Programmierung eines Roboters
 - Technische Simulation von tierischem Verhalten mit einem Asuro Roboter
- **Höhere Funktionen des Gehirns**
 - Motorisches Lernen
 - Prismabrille und zielgerichtetes Verhalten, Störungen bei Bedienungen, Spiegelschrift
 - Elektroenzephalographie
 - Spontanes EEG mit offenen und geschlossenen Augen, Frequenzbänder, Demonstration eines Schachbrettmusters, Spezifische Antworten z. B. bei Gesichtsbetrachtung, Veränderungsblindheit im EEG, zeitliches Auflösungsvermögen

13) Schülerlabor Neurowissenschaften

Goethe-Universität – Frankfurt (Hessen)

<http://www.goethe-biolab.de>

Zielgruppe: 7. Klasse – Sek. II

Themen:

Mikroskopie (5. – 8. Klasse)

Anhang

- Unterschiedlicher mikroskopische Techniken, struktureller Aufbau von Sinnesorganen in der Insektenwelt, Zusammenhang zwischen biologischen Strukturen und deren Funktion, Zellen und ihrer Struktur, Organisationsstufen, Erster Zugang zu Nervenzellen

Sinnessysteme (ab Klasse 9)

- Wahrnehmungsprozessen mit Hilfe der Eyetracking-Technik im Selbstversuch

Verhaltensbiologie (Sek. II)

- Eigene Verhaltensstudien, Hör- und Gesangsorgane von *Gryllus bimaculatus*, Zusammenhang zwischen biologischen Strukturen und deren Funktion, Grillengesänge

Elektrophysiologie (Sek. II)

- Elektrophysiologische Humanbiologie (EKG, EMG, EEG), Durchführung simulierter elektrophysiologischen Messungen

14) Science College Overbach

Haus Overbach gGmbH - Jülich-Barmen (Nordrhein-Westfalen)

<http://www.letsdoscience.de/>

Zielgruppe: 15 – 19 Jahre

Themen: Ferienakademie zu **Chemie und Hirnforschung**

15) Science-Live-Lemgo

Engelbert Kaempfer Gymnasium/Wallschule – Lemgo (Nordrhein-Westfalen)

<http://www.science-live-lemgo.de/>

Zielgruppe: Sek II

Themen:

Neurophysiologie

- **Amyotrophe Lateralsklerose**
 - Neurodegenerative Erkrankungen, neurophysiologisch / stoffwechselphysiologische / genetische Ursachen am Mausmodell, Histologische Untersuchung, PCR
- **Blick ins Gehirn**
 - Präparation Schweinegehirn, Membranpotenziale (Modellexperiment)
- **Experimente am Schweineauge**

16) Sinnesschule

Carl von Ossietzky Universität - Oldenburg (Niedersachsen)

<https://uol.de/biodidaktik/lehr-lern-labore/sinnesschule/>

Zielgruppe: Ab Grundschule – Sek I

Themen: Interaktive Ausstellung zur **Wahrnehmung**

17) SinnTec Schülerforschungszentrum

Universität Saarland - Saarlouis (Saarland)

<http://www.sinntec.uni-saarland.de/>

Zielgruppe: 9. – 10. Klasse

Themen:

Sensorik / technische Sinnesorgane - Licht- und Farbwahrnehmung

- Menschliches und technisches Auge, Frequenzträchtigkeit, Phototransistoren, Pupillenmodulationen, Farbdarstellungen

18) Turmdersinne

Nürnberg (Bayern)

www.turmdersinne.de

Zielgruppe: Alle interessierten Einzelbesucher, Gruppen und Schulklassen

Themen: Mitmachmuseum zur **Sinnesphysiologie & Wahrnehmung**

- Sinne, Wahrnehmung, neuronale Verarbeitungen, Optik

19) XLAB - Göttinger Experimentallabor für junge Leute

Georg-August-Universität - Göttingen (Niedersachsen)

<http://www.xlab-goettingen.de/biologie.html>

Zielgruppe: Unbekannt

Themen:

Gehirn Anatomie

- Präparation von Gehörorganen, Gesichtsnerven, Sehbahnen etc. an Schweineköpfen

Biophysik

- Neurophysiologie, unterschiedliche Mess- und Darstellungsmethoden der elektrischen Eigenschaften biologischer Systeme

Neurobiologie

- **Membranpotenzial**
 - Membranpotenzial Messungen an künstlicher Membran und intrazelluläre Ableitungen von Frosch Oozyten, Nernst-Gleichung
- **Neurophysiologie**
 - Intrazelluläre Ableitungen von Frosch Oozyten, Ruhe- und Aktionspotenziale der Nervenzellen des Blutegels
- **Verhaltensbeobachtungen und Elektrophysiologie**
 - Extrazelluläre Messungen der Spannungsimpulse von elektrischen Fischen, Entladungsmuster und Verhaltensweisen, bioelektrische Signale
- **Elektrophysiologie**
 - Extrazelluläre elektrophysiologische Messungen am Regenwurm, Rückziehreflex, Diversität von Reflexantworten, Leitungsgeschwindigkeiten, Computersimulation
- **Visuelles System**
 - Signaltransduktion mit elektrophysiologischen Messungen in Photorezeptoren, Flickerfusionsfrequenz, Summenableitungen der elektrischen Aktivität des Heuschreckenauges (Elektroretinogramm), Aktionspotenziale von bewegungssensitiven Interneuronen der Wanderheuschrecke, Bewegungssehen

Physiologie

- **Sportphysiologie**
 - Blutgefäße, Herz, Lunge, EKG-Messungen, Spirometrie, Pulsfrequenz, Blutdruck, Präparation Herz und Lunge (Schwein)

20) zdi-Schülerlabor der Hochschule Hamm-Lippstadt

Hochschule Hamm-Lippstadt - Kleve (Nordrhein-Westfalen)

<https://www.hshl.de/junior-campus/zdi-schuelerlabor/>

Zielgruppe: 5.-7. Klasse

Themen: Gehör - Funktionsweise, Schall, Luft und Knochenleitung

B Fragebogendokumentation

B.1 Befragung der Lehrkräfte

Demografische Daten

Kurzitem	Item	Antwortfelder
Geschlecht	Geben Sie bitte Ihr Geschlecht an!	<input type="checkbox"/> Weiblich <input type="checkbox"/> Männlich
Alter	Welcher Altersgruppe gehören Sie an?	<input type="checkbox"/> unter 30 <input type="checkbox"/> 50 bis 59 <input type="checkbox"/> 30 bis 39 <input type="checkbox"/> 60 und älter <input type="checkbox"/> 40 bis 49
Arbeitszeit	Wie lange arbeiten Sie schon in Ihrem derzeitigen Tätigkeitsbereich?	<input type="checkbox"/> unter 4 Jahre <input type="checkbox"/> 10 bis 19 Jahre <input type="checkbox"/> 4 bis 9 Jahre <input type="checkbox"/> über 20 Jahre
Tätigkeitsbereich	In welchem Tätigkeitsbereich arbeiten Sie?	<input type="checkbox"/> Hauptschule <input type="checkbox"/> Realschule <input type="checkbox"/> Gymnasium <input type="checkbox"/> Oberstufengymnasium <input type="checkbox"/> Gesamtschule <input type="checkbox"/> Berufliche Schule
Unterrichtsfächer	Meine studierten Unterrichtsfächer sind:	<i>Offene Frage</i>

Zum besuchten Schülerlabortag

Kurzitem	Item	Antwortfelder
Weiterempfehlung an Kollegen/innen	Ich werde den Besuch des heutigen Labortages meinen Kolleginnen & Kollegen weiter empfehlen.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft voll zu
Als dauerhaftes Angebot wünschenswert	Der heutige Labortag sollte als dauerhaftes Angebot auch in kommenden Jahren bestehen bleiben.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft voll zu
Neue Methoden Schüler	Meine SchülerInnen haben neue Methoden gelernt.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft voll zu
Neue Inhalte Schüler	Meine SchülerInnen haben neue Inhalte gelernt.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft voll zu
Neue Methoden Lehrer	Ich selbst habe neue Methoden gelernt.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft voll zu
Neue Inhalte Lehrer	Ich selbst habe neue Inhalte kennen gelernt.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft voll zu
Mit erzielten Ergebnissen zufrieden	Ich bin mit den erzielten Ergebnissen der Schülerinnen und Schüler zufrieden.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft voll zu
Inhalte lassen sich in den Unterricht integrieren	Die Inhalte des heutigen Schülerlabortages lassen sich gut in meinen Unterricht integrieren.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft voll zu
Anregungen für den eigenen Unterricht	Der Schülerlabortag lieferte nützliche Anregungen für meine eigene Schulpraxis.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft voll zu
Ergänzung zum Fachunterricht	Für mich stellt der Besuch von Schülerlaboren eine sinnvolle Ergänzung zum Fachunterricht dar.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft voll zu

Fett hervorgehoben sind die übernommenen Items aus dem Musterfragebogen der Hessischen Lehrkräfteakademie (2013).

Schülerlaborangebote und Praxis

Kurzitem: Gewünschte Labortage

- 1) *Zellen und Gewebe (Einführung in die Mikroskopie)*
- 2) *Sinnesphysiologie (Auge)*
- 3) *Sinnesphysiologie (Ohr)*
- 4) *Fotosynthese und Zellatmung*
- 5) *Blut und Immunsystem*
- 6) *Humanbiologie*
(Elektrophysiologie von Herz & Muskel)
- 7) *Zellbiologie (Histologie / Färbemethoden)*
- 8) *Zellbiologie (Diffusion und Osmose)*
- 9) *Genetik (Methoden der Gentechnik)*
- 10) *Wechselbeziehungen zwischen Umwelt und Mensch*
(z. B. Ökotoxikologie)
- 11) *Verhaltensbiologie*
- 12) *Neurobiologie*
(Aufbau & Funktionsweise von Neuronen)
- 13) *Neurobiologie (Aufbau & Funktionsweise des Gehirns)*
- 14) *Evolution*
(z. B. paläoanthropologische Forschungsmethoden)

Item: Für welche folgenden Themenbereiche wäre eine dauerhafte Ergänzung durch experimentelle Angebote im Schülerlabor wünschenswert?

- | | | | | | |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| nicht notwendig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr wünschenswert |
| nicht notwendig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr wünschenswert |
| nicht notwendig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr wünschenswert |
| nicht notwendig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr wünschenswert |
| nicht notwendig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr wünschenswert |
| nicht notwendig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr wünschenswert |
| nicht notwendig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr wünschenswert |
| nicht notwendig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr wünschenswert |
| nicht notwendig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr wünschenswert |
| nicht notwendig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr wünschenswert |
| nicht notwendig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr wünschenswert |
| nicht notwendig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr wünschenswert |

Kurzitem: Schülerexperimente

Item: Zu welchen der oben genannten Themenbereiche führen Sie selbst **Schülerexperimente** in der Schule durch (Mehrfachnennungen möglich)?

- | | | | | |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1) <input type="checkbox"/> | 2) <input type="checkbox"/> | 3) <input type="checkbox"/> | 4) <input type="checkbox"/> | 5) <input type="checkbox"/> |
| 6) <input type="checkbox"/> | 7) <input type="checkbox"/> | 8) <input type="checkbox"/> | 9) <input type="checkbox"/> | 10) <input type="checkbox"/> |
| 11) <input type="checkbox"/> | 12) <input type="checkbox"/> | 13) <input type="checkbox"/> | 14) <input type="checkbox"/> | |

Kurzitem: Demonstrationsexperimente

Item: Zu welchen der oben genannten Themenbereiche führen Sie selbst **Demonstrationsexperimente** in der Schule durch (Mehrfachnennungen möglich)?

- | | | | | |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1) <input type="checkbox"/> | 2) <input type="checkbox"/> | 3) <input type="checkbox"/> | 4) <input type="checkbox"/> | 5) <input type="checkbox"/> |
| 6) <input type="checkbox"/> | 7) <input type="checkbox"/> | 8) <input type="checkbox"/> | 9) <input type="checkbox"/> | 10) <input type="checkbox"/> |
| 11) <input type="checkbox"/> | 12) <input type="checkbox"/> | 13) <input type="checkbox"/> | 14) <input type="checkbox"/> | |

B.2 Befragung der Schüler – Feedback

Demografische Daten

Kurzitem	Item	Antwortfelder	
Geschlecht	Dein Geschlecht	<input type="checkbox"/> Weiblich	<input type="checkbox"/> Männlich
Schulsystem	Dein Schulsystem	<input type="checkbox"/> G8	<input type="checkbox"/> G9
Kursform	Ich besuche einen Biologie-	<input type="checkbox"/> Leistungskurs	<input type="checkbox"/> Grundkurs
Alter	Dein Alter (in Jahren)	<input type="checkbox"/> 9-10	<input type="checkbox"/> 17-18
		<input type="checkbox"/> 11-12	<input type="checkbox"/> 19-20
		<input type="checkbox"/> 13-14	<input type="checkbox"/> 21-22
		<input type="checkbox"/> 15-16	
Jahrgangsstufe	In welcher Jahrgangsstufe bist Du?	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> E
		<input type="checkbox"/> 6	<input type="checkbox"/> Q1
		<input type="checkbox"/> 7	<input type="checkbox"/> Q2
		<input type="checkbox"/> 8	<input type="checkbox"/> Q3
		<input type="checkbox"/> 9	<input type="checkbox"/> Q4
		<input type="checkbox"/> 10	

Einzelitems

Kurzitem	Item	Antwortfelder	
Interessensänderung	Der heutige Tag hat mein Interesse positiv verändert.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	stimme voll zu
Stärken	Bitte nenne drei Stärken der Veranstaltung.	<i>Offene Frage</i>	
Verbesserungen	Bitte nenne drei Punkte, durch die diese Veranstaltung verbessert werden könnte.	<i>Offene Frage</i>	
Note	In einer Note zusammengefasst, würde ich der Veranstaltung folgende Note geben.	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6
Probleme	Bei welchen Versuchen hattest du Probleme?	<i>Offene Frage</i>	
Lehrreich	Welche Versuche schätzt du als besonders lehrreich ein?	<i>Offene Frage</i>	

Retrospektive Prä-Post Erhebung des Lernzuwachses

So ist es jetzt NACH der Veranstaltung			
Post-Wissen	Ich weiß viel über das Thema der Veranstaltung.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	trifft voll zu
Post-Anwendungszuversicht	Ich kann die Inhalte der Veranstaltung anwenden.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	trifft voll zu
Post-Interesse	Ich finde das Thema der Veranstaltung interessant.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	trifft voll zu
So war es VOR der Veranstaltung			
Prä-Wissen	Ich weiß viel über das Thema der Veranstaltung.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	trifft voll zu
Prä-Anwendungszuversicht	Ich kann die Inhalte der Veranstaltung anwenden.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	trifft voll zu
Prä-Interesse	Ich finde das Thema der Veranstaltung interessant.	trifft gar nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	trifft voll zu

Komponentenitems Feedback

Komponente	Item	Antwortfelder
Ausgangsinteresse Biologie & Forschung („Ausgangsinteresse“)	Ich habe ein großes Interesse an biologischen Themen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Ich habe ein großes Interesse an neurobiologischen Themen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Ich habe ein großes Interesse, biologische Forschungsmethoden zu erproben oder anzuwenden.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Strukturierung von Inhalten und Anschaulichkeit („Strukturierung“)	Der vermittelte Stoff ist gut strukturiert.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Medien (z. B. Texte, Tafel, Folien oder PowerPoint) werden in geeigneter Weise eingesetzt.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Inhalte werden anschaulich vermittelt.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	In der Veranstaltung werden auch schwierige Inhalte verständlich erklärt.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	In der Veranstaltung sind inhaltliche Zusammenhänge („roter Faden“) deutlich erkennbar.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Wissensvermittlung durch die Lehrperson („Wissensvermittlung“)	Die Lehrperson erklärt neue Begriffe und Konzepte klar und nachvollziehbar.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Lehrperson hebt wichtige Aspekte besonders hervor.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Lehrperson gibt anschauliche Beispiele, die zum Verständnis des Lerninhalts / Stoffs beitragen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Lehrperson fasst wichtige Aspekte zusammen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Lehrperson wiederholt und vertieft besonders schwierige Aspekte ausreichend.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Lerndienliche Atmosphäre	Die Betreuer geben hilfreiches Feedback zu den Beiträgen der SchülerInnen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Betreuer geben bei Verständnisschwierigkeiten hilfreiche Hinweise.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Betreuer stärken SchülerInnen bei Misserfolg im Lernprozess.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Betreuer achten darauf, eine wertschätzende Lehr-/ Lernatmosphäre herzustellen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu

Fortsetzung Komponentenitems Feedback

Komponente	Item	Antwortfelder
Motivierende Atmosphäre	Die Betreuer erreichen, dass sich die meisten SchülerInnen aktiv an der Veranstaltung beteiligen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Betreuer gestalten die Veranstaltung abwechslungsreich.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Lehrperson fesselt die SchülerInnen durch eine anregende und engagierte Vortragsweise.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Betreuer eröffnen den SchülerInnen Möglichkeiten, sich mit interessanten Inhalten eingehender zu beschäftigen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Betreuer ermutigen die SchülerInnen bei der Aneignung schwieriger Inhalte.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Einblick in wissenschaftliche Forschungsarbeit („Einblick“)	Durch die Veranstaltung habe ich Einblick in aktuelle Forschung erhalten.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Durch die Veranstaltung verstehe ich besser, was wissenschaftliches Denken und Arbeiten ist.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Ohne Komponentenbildung	Das Tempo der Veranstaltung ist angemessen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Lehrperson stellt immer wieder Bezüge zum Vorwissen der SchülerInnen her.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Lehrperson stellt Fragen, die den SchülerInnen die Gelegenheit geben, zu überprüfen, ob sie den Inhalt verstanden haben	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Lehrperson vergewissert sich, dass die SchülerInnen zentrale Aspekte verstanden haben, bevor sie im Stoff weitergeht.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Betreuer drücken sich klar und verständlich aus.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu

Grau hervorgehoben sind die Items, die aus der PCA entfallen mussten und nicht in den Auswertungen berücksichtigt sind.

B.3 Simulationsbewertung (nach Chen et al. 2016)

Demografische & allgemeine Daten

Kurzitem	Item	Antwortfelder
Geschlecht	Dein Geschlecht	<input type="checkbox"/> Weiblich <input type="checkbox"/> Männlich
Schulsystem	Dein Schulsystem	<input type="checkbox"/> G8 <input type="checkbox"/> G9
Kursform	Ich besuche einen Biologie-	<input type="checkbox"/> Leistungskurs <input type="checkbox"/> Grundkurs <input type="checkbox"/> Sek. 1 Kurs <input type="checkbox"/> Ich habe Biologie abgewählt
Alter	Dein Alter (in Jahren)	<input type="checkbox"/> 9-10 <input type="checkbox"/> 17-18 <input type="checkbox"/> 11-12 <input type="checkbox"/> 19-20 <input type="checkbox"/> 13-14 <input type="checkbox"/> 21-22 <input type="checkbox"/> 15-16
Jahrgangsstufe	In welcher Jahrgangsstufe bist Du?	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> E <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> Q1 <input type="checkbox"/> 7 <input type="checkbox"/> Q2 <input type="checkbox"/> 8 <input type="checkbox"/> Q3 <input type="checkbox"/> 9 <input type="checkbox"/> Q4 <input type="checkbox"/> 10
Biologieinteresse	Wie interessiert bist du am Schulfach Biologie?	nicht interessiert <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr interessiert
Simulationssoftware	Ich habe vor meinem Besuch im Schülerlabor bereits mit Simulationssoftware gearbeitet.	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Angewendete Simulation	Welche Simulationsmethode hast du heute angewendet?	<input type="checkbox"/> Nur am PC <input type="checkbox"/> Mit Setup Aufbau
Präferenz	Ich hätte lieber die andere Simulation durchgeführt.	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein

Einzelitems Simulationsbewertung

Kurzitem	Item	Antwortfelder
Simulation ist einfach durchzuführen	Die Simulation ⁴ war einfach auszuführen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Verstanden, was die Simulation darstellen soll	Ich habe verstanden, was die Simulation darstellen sollte.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Simulation gab einen Eindruck von einem realen EPhys-Setup	Die Simulation gab mir einen Eindruck von einem realen Elektrophysiologie Setup.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Simulation von EPhys Messung ist eine gute Erfahrung	Die Simulation der elektrophysiologischen Messungen ist eine gute Erfahrung.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Gute Erfahrung auch ohne Interesse	Auch wenn ich zukünftig keine Neurobiologie studieren möchte, war die Simulation eine gute Erfahrung.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu

⁴ Mit der Bezeichnung „Simulation“ innerhalb der Testinstrument-Items sind grundsätzlich beide Simulationsumsetzungen gemeint.

Fortsetzung Einzelitems Simulationsbewertung

Kurzitem	Item	Antwortfelder
Nutzung der Simulation ist besser, um Inhalte zu erarbeiten	Die Nutzung einer Simulation im Vergleich zur Arbeit mit Arbeitszetteln ist meiner Meinung nach die bessere Methode.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Simulation ist Zeitverschwendung	Die Simulation war eine Zeitverschwendung.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Würde Schülerlabortag empfehlen	Ich würde den Schülerlabortag anderen SchülerInnen empfehlen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Es wäre gut, virtuelle Setups mit weiteren Versuchen zu haben	Es wäre gut für die Lernerfahrung, mehr als ein virtuelles Setup zu haben mit weiteren Versuchen zur Elektrophysiologie.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu

Komponentenitems Simulationsbewertung

Komponente	Item	Antwortfelder
Computerfähigkeiten / Computerselbstwirksamkeit (PC_SE)	Der Umgang mit Computern fällt mir persönlich leicht.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Mit der Bearbeitung von Aufgaben mit Computerprogrammen komme ich gut zurecht.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Es fällt mir leicht, mithilfe von Computersoftware Inhalte zu lernen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Enjoyment & Approval (EA)/ Freude und Annahme	Ich würde den Schülerlabortag anderen SchülerInnen empfehlen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Auch wenn ich zukünftig keine Neurobiologie studieren möchte, war die Simulation eine gute Erfahrung.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Simulation war eine Zeitverschwendung.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Simulation der elektrophysiologischen Messungen ist eine gute Erfahrung.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Simulation gab mir einen Eindruck von einem realen Elektrophysiologie Setup.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Understanding (US) / Verständnis	Ich habe verstanden, was die Simulation darstellen soll.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Simulation war einfach auszuführen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Simulation half mir beim Verständnis der Elektrophysiologie.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Nutzung einer Simulation im Vergleich zur Arbeit mit Arbeitszetteln ist meiner Meinung nach die bessere Methode, um Inhalte zu erarbeiten.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu

B.4 Lab Motivation Scale (nach Dohn et al. 2016)

Demografische & allgemeine Daten

Kurzitem	Item	Antwortfelder
Geschlecht	Dein Geschlecht	<input type="checkbox"/> Weiblich <input type="checkbox"/> Männlich
Schulsystem	Dein Schulsystem	<input type="checkbox"/> G8 <input type="checkbox"/> G9
Kursform	Ich besuche einen Biologie-	<input type="checkbox"/> Leistungskurs <input type="checkbox"/> Grundkurs <input type="checkbox"/> Sek. 1 Kurs <input type="checkbox"/> Ich habe Biologie abgewählt
Alter	Dein Alter (in Jahren)	<input type="checkbox"/> 9-10 <input type="checkbox"/> 17-18 <input type="checkbox"/> 11-12 <input type="checkbox"/> 19-20 <input type="checkbox"/> 13-14 <input type="checkbox"/> 21-22 <input type="checkbox"/> 15-16
Jahrgangsstufe	In welcher Jahrgangsstufe bist Du?	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> E <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> Q1 <input type="checkbox"/> 7 <input type="checkbox"/> Q2 <input type="checkbox"/> 8 <input type="checkbox"/> Q3 <input type="checkbox"/> 9 <input type="checkbox"/> Q4 <input type="checkbox"/> 10
Biologieinteresse	Wie interessiert bist du am Schulfach Biologie?	nicht <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr interessiert interessiert
Simulationssoftware	Ich habe vor meinem Besuch im Schülerlabor bereits mit Simulationssoftware gearbeitet.	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Angewendete Simulation	Welche Simulationsmethode hast du heute angewendet?	<input type="checkbox"/> Nur am PC <input type="checkbox"/> Mit Setup Aufbau
Präferenz	Ich hätte lieber die andere Simulation durchgeführt.	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein

Komponentenitems LMS

Komponente	Item	Antwortfelder
Computerfähigkeiten / Computerselbstwirksamkeit (PC_SE)	Der Umgang mit Computern fällt mir persönlich leicht.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Mit der Bearbeitung von Aufgaben mit Computerprogrammen komme ich gut zurecht.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Es fällt mir leicht, mithilfe von Computersoftware Inhalte zu lernen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Effort (EFF) / Bemühungen	Ich bin mit meiner Leistung im Arbeiten mit dem Setup ⁵ zufrieden.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Ich denke, ich war ziemlich gut im Arbeiten mit dem Setup.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Ich denke, ich habe mich im Arbeiten mit dem Setup gut geschlagen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Arbeit mit dem Setup war eine Tätigkeit, die ich nicht so gut erfüllen konnte.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Interest (INT) / Interesse	Das Arbeiten mit dem Setup hat Spaß gemacht.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Das Arbeiten mit dem Setup war spannend.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Das Arbeiten mit dem Setup hat mir sehr viel Freude bereitet.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Das Arbeiten mit dem Setup war interessant.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Ich fand die Arbeit mit dem Setup langweilig.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu

⁵ Mit der Bezeichnung „Setup“ innerhalb der Testinstrument-Items sind grundsätzlich beide Simulationsumsetzungen gemeint.

Fortsetzung Komponentenitems LMS

Komponente	Item	Antwortfelder
Self-efficacy (SE_LE) / Selbstwirksamkeit im Sinne des Lernerfolgs	Ich bin zuversichtlich, dass ich andere Schülerinnen und Schüler jetzt in der Thematik unterstützen könnte.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Ich bin zuversichtlich, dass ich die Methoden der elektrophysiologischen Messung jetzt erläutern könnte.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Ich bin zuversichtlich, dass ich die Abiturprüfung im Bereich der Neurobiologie bestehen werde.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Ich bin sicher, dass ich von dem Schülerlabortag etwas gelernt habe.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Nach dem Besuch im Labor fühle ich mich ziemlich kompetent.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Ohne Komponentenbildung	Ich war sehr beschäftigt mit der Arbeit am Setup.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Ich habe mir nicht sehr viel Mühe gegeben, gut im Arbeiten mit dem Setup zu sein.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Ich habe mir sehr viel Mühe beim Arbeiten mit dem Setup gegeben.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Es war mir wichtig, gut im Arbeiten mit dem Setup zu sein.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu

Grau hervorgehoben sind die Items, die aus der PCA entfallen mussten und nicht in den Auswertungen berücksichtigt sind.

B.5 Technology Acceptance Model (zurückgehend auf Davis 1985)

Demografische & allgemeine Daten

Kurzitem	Item	Antwortfelder
Geschlecht	Dein Geschlecht	<input type="checkbox"/> Weiblich <input type="checkbox"/> Männlich
Schulsystem	Dein Schulsystem	<input type="checkbox"/> G8 <input type="checkbox"/> G9
Kursform	Ich besuche einen Biologie-	<input type="checkbox"/> Leistungskurs <input type="checkbox"/> Grundkurs <input type="checkbox"/> Sek. 1 Kurs <input type="checkbox"/> Ich habe Biologie abgewählt
Alter	Dein Alter (in Jahren)	<input type="checkbox"/> 9-10 <input type="checkbox"/> 17-18 <input type="checkbox"/> 11-12 <input type="checkbox"/> 19-20 <input type="checkbox"/> 13-14 <input type="checkbox"/> 21-22 <input type="checkbox"/> 15-16
Jahrgangsstufe	In welcher Jahrgangsstufe bist Du?	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> E <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> Q1 <input type="checkbox"/> 7 <input type="checkbox"/> Q2 <input type="checkbox"/> 8 <input type="checkbox"/> Q3 <input type="checkbox"/> 9 <input type="checkbox"/> Q4 <input type="checkbox"/> 10
Biologieinteresse	Wie interessiert bist du am Schulfach Biologie?	nicht interessiert <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr interessiert
Simulationssoftware	Ich habe vor meinem Besuch im Schülerlabor bereits mit Simulationssoftware gearbeitet.	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Angewendete Simulation	Welche Simulationsmethode hast du heute angewendet?	<input type="checkbox"/> Nur am PC <input type="checkbox"/> Mit Setup Aufbau
Präferenz	Ich hätte lieber die andere Simulation durchgeführt.	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Schulnote	Wie bewertest du die virtuelle Umsetzung des Setups (Schulnote)?	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 6

Komponentenitems TAM

Komponente	Item	Antwortfelder
Computerfähigkeiten / Computerselbstwirksamkeit (PC_SE)	Der Umgang mit Computern fällt mir persönlich leicht.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Mit der Bearbeitung von Aufgaben mit Computerprogrammen komme ich gut zurecht.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Es fällt mir leicht, mithilfe von Computersoftware Inhalte zu lernen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu

Fortsetzung Komponentenitems TAM

Komponente	Item	Antwortfelder
Perceived Ease of Use / wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (PEOU)	Ich fand, das virtuelle Setup ⁶ umständlich zu bedienen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Das Arbeiten mit dem virtuellen Setup war klar und verständlich.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Ich fand, das virtuelle Setup leicht zu benutzen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Nutzung des virtuellen Setups hat mich verwirrt.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Ich hatte während der Durchführung Probleme mit dem virtuellen Setup.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Es fiel mir leicht zu lernen, wie man das virtuelle Setup bedient.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
Perceived Usefulness / wahrgenommene Nützlichkeit (PU)	Lernen mit dem virtuellen Setup ist eine sinnvolle Idee.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Ich fände es vorteilhaft, das virtuelle Setup zum Lernen zu benutzen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Die Verwendung des Setups würde das Lernen für die Neurobiologie einfacher machen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Lernen mit dem virtuellen Setup ist eine gute Idee.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Ich würde das virtuelle Setup in der Schule nützlich finden.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Das virtuelle Setup könnte es einfacher machen, Unterrichtsinhalte zu lernen.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu
	Das virtuelle Setup könnte meine Lernleistung in der Neurobiologie verbessern.	stimme überhaupt nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme voll zu

⁶Mit der Bezeichnung „Setup“ innerhalb der Testinstrument-Items sind grundsätzlich beide Simulationsumsetzungen gemeint.

Fortsetzung Komponentenitems TAM

Komponente	Item	Antwortfelder
Perceived Enjoyment / wahrgenommene Freude (PE)	Ich fand es unterhaltsam, das virtuelle Setup zu nutzen.	stimme überhaupt nicht zu □ □ □ □ □ stimme voll zu
	Ich hatte Spaß dabei, das virtuelle Setup zu benutzen.	stimme überhaupt nicht zu □ □ □ □ □ stimme voll zu
	Ich fand das virtuelle Setup motivierend.	stimme überhaupt nicht zu □ □ □ □ □ stimme voll zu
	Die praktische Nutzung des virtuellen Setups war ansprechend.	stimme überhaupt nicht zu □ □ □ □ □ stimme voll zu
	Ich hatte das Gefühl, an einem realen Mess-Setup zu arbeiten.	stimme überhaupt nicht zu □ □ □ □ □ stimme voll zu
Ohne Komponentenbildung	Ich bin dem virtuellen Setup gegenüber positiv eingestellt.	stimme überhaupt nicht zu □ □ □ □ □ stimme voll zu
	Ich fühlte mich bei der Durchführung der Experimente souverän.	stimme überhaupt nicht zu □ □ □ □ □ stimme voll zu
	Ich erreichte ein klares Verständnis von den Experimenten und den zugehörigen Inhalten.	stimme überhaupt nicht zu □ □ □ □ □ stimme voll zu
	Es war einfach für mich, die Ergebnisse der Versuche zu interpretieren.	stimme überhaupt nicht zu □ □ □ □ □ stimme voll zu
	Ich empfand die Anleitungen als hilfreich.	stimme überhaupt nicht zu □ □ □ □ □ stimme voll zu
	Das Arbeiten mit dem virtuellen Setup war oft frustrierend.	stimme überhaupt nicht zu □ □ □ □ □ stimme voll zu
	Das Arbeiten mit dem virtuellen Setup forderte viel von meiner geistigen Leistung.	stimme überhaupt nicht zu □ □ □ □ □ stimme voll zu
	Ich fand es einfach, das virtuelle Setup dazu zu bringen, das zu tun, was ich wollte.	stimme überhaupt nicht zu □ □ □ □ □ stimme voll zu
Die Messung und Analyse der Daten war einfach für mich.	stimme überhaupt nicht zu □ □ □ □ □ stimme voll zu	

Grau hervorgehoben sind die Items, die aus der PCA entfallen mussten und nicht in den Auswertungen berücksichtigt sind.

C Verteilungstabellen

Tabelle 30: Verteilung der Geschlechter, Kursformen und Schulformen (in Prozent) auf die Erhebungsinstrumente.

Erhebungsinstrument	Stichprobengröße n	Stichprobenverteilung					
		Geschlecht		Kursform		Schulform	
		M	W	LK	GK	Gym	Ges
Feedback	381	36	64	82	18	81	9
Simulationsbewertung/ LMS	235	37	63	85	15	74	26
TAM	193	35	65	82	18	76	24

Tabelle 31: Verteilung der Geschlechter, Kursformen und Schulformen (in Prozent) auf die SLT bezüglich der Feedback-Erhebung

Labortag	Geschlecht		Kursform		Schulform	
	M	W	LK	GK	Gym	Ges
Verhalten	42	58	75	25	100	0
Summenpotenzial	38	62	83	17	83	17
Elektrophysiologie	34	66	83	17	75	25

Tabelle 32: Verteilung der Geschlechter, Kursformen und Schulformen (in Prozent) auf die Untersuchungs-Untergruppen bezüglich des SLT „Verhalten“.

Vergleichsvariable	Einteilung	Verhalten					
		M	W	LK	GK	Gym	Ges
Ausgangsinteresse Biologie und Forschung	Sehr interessiert	42	58	74	26	100	-
	Interessiert	47	53	74	26	100	-
	Nicht interessiert	0	100	100	0	100	-

Tabelle 33: Verteilung der Geschlechter, Kursformen und Schulformen (in Prozent) auf die Untersuchungs-Untergruppen bezüglich des SLT „Summenpotenzial“.

Vergleichsvariable	Einteilung	Summenpotenzial					
		M	W	LK	GK	Gym	Ges
Ausgangsinteresse Biologie und Forschung	Sehr interessiert	39	61	85	15	85	15
	Interessiert	38	62	79	21	82	18
	Nicht interessiert	33	67	100	0	67	33

Tabelle 34: Verteilung der Geschlechter, Kursformen und Schulformen (in Prozent) auf die Untersuchungs-Untergruppen bezüglich des SLT „Elektrophysiologie“.

Vergleichsvariable	Einteilung	Elektrophysiologie					
		M	W	LK	GK	Gym	Ges
Ausgangsinteresse Biologie und Forschung	Sehr interessiert	28	72	89	11	78	22
	Interessiert	37	63	79	21	69	31
	Nicht interessiert	80	20	40	60	90	10

Tabelle 35: Verteilung der Geschlechter, Kursformen und Schulformen (in Prozent) auf die Untersuchungs-Untergruppen bezüglich der Erhebungen Simulationsbewertung und LMS.

Vergleichsvariable	Einteilung	Simulationsbewertung & LMS							
		Setup	PC	M	W	LK	GK	Gym	Ges
Simulationsumsetzung	PC-Gruppe			29	71	91	9	83	17
	Setup-Gruppe			40	60	83	17	70	30
Biologieinteresse	Sehr interessiert	66	34	31	69	93	7	73	27
	Interessiert	68	32	40	60	79	21	74	26
	Nicht interessiert	100	0	86	14	29	71	86	14
Computerfähigkeiten	Gut	67	33	33	57	85	15	72	18
	Mittel	70	30	22	78	87	13	83	17
	Schlecht	75	25	25	75	81	9	56	44

Tabelle 36: Verteilung der Geschlechter, Kursformen und Schulformen (in Prozent) auf die Untersuchungs-Untergruppen bezüglich der Erhebung TAM.

Vergleichsvariable	Einteilung	TAM							
		Setup	PC	M	W	LK	GK	Gym	Ges
Simulationsumsetzung	PC-Gruppe			29	71	90	10	81	19
	Setup-Gruppe			38	62	77	33	73	27
Biologieinteresse	Sehr interessiert	60	40	28	72	90	10	76	24
	Interessiert	67	33	39	61	77	33	73	27
	Nicht interessiert	86	14	71	29	29	71	100	0
Computerfähigkeiten	Gut	63	37	41	59	81	19	73	27
	Mittel	67	33	19	81	85	15	85	15
	Schlecht	67	33	33	67	75	25	67	33

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Standorte der Schülerlabore in Deutschland.....	14
Abbildung 2: Die zentralen Funktionen von Experimenten im Biologieunterricht.....	19
Abbildung 3: Deutschsprachige Version des Modells von Authentizität in Lehr-Lernkontexten.....	23
Abbildung 4: Prozentuale Verteilung der Lernorte mit biologischen Inhalten.....	54
Abbildung 5: Das Technology Acceptance Model	62
Abbildung 6: Die Stichproben Kategorien für Analysen mit dem TAM im Bildungskontext	65
Abbildung 7: Das General Extended Technology Acceptance Model for E-Learning (GETAMEL)	67
Abbildung 8: Medialer Versuchsaufbau zu den Verhaltensstudien mit der Zweifleckgrille.....	73
Abbildung 9: Schematischer Aufbau des EPhys-Setups.....	80
Abbildung 10: Realer Aufbau des EPhys-Setups.	80
Abbildung 11: Einzelkomponenten des EPhys-Setups im Detail.....	81
Abbildung 12: Konstruktion des virtuellen Nervensystems eines Blutegel-Ganglions.	81
Abbildung 13: Die GUI der Neurosimulation	83
Abbildung 14: Blutegel-Ganglion mit Beschriftung der exemplarisch untersuchten Nervenzellen. .	84
Abbildung 15: Die Neurosimulations-GUI der Kontrollgruppe.....	87
Abbildung 16: Untersuchungsdesign der beiden Simulationsumsetzungen.....	95
Abbildung 17: Prozentualer Anteil der befragten Lehrkräfte, die zu den genannten Themenbereichen Schülerexperimente in der Schule durchführen.....	105
Abbildung 18: Prozentualer Anteil der befragten Lehrkräfte, die zu den genannten Themenbereichen Demonstrationsexperimente in der Schule durchführen.....	106
Abbildung 19: Gewünschte Schülerlabortage der befragten Lehrkräfte	107
Abbildung 20: Feedback der Lehrkräfte zu den SLT.....	108
Abbildung 21: Bewertungskomponenten der befragten Schüler zu den SLT im Vergleich.	111
Abbildung 22: Bewertungskomponenten der befragten Schüler zum SLT „Verhalten“ in Abhängigkeit vom „Ausgangsinteresse an Biologie und Forschung“.....	115
Abbildung 23: Bewertungskomponenten der befragten Schüler zum SLT „Summenpotenzial“ in Abhängigkeit vom „Ausgangsinteresse an Biologie und Forschung“.....	116
Abbildung 24: Bewertungskomponenten der befragten Schüler zum SLT „Elektrophysiologie“ in Abhängigkeit vom „Ausgangsinteresse an Biologie und Forschung“.....	117
Abbildung 25: Mittelwertvergleiche der retrospektiven Prä-Post-Erhebung.....	118

Abbildung 26: Betrachtung des Lernzuwachses der retrospektiven Prä-Post-Erhebung in Abhängigkeit von den Prä-Werten.....	121
Abbildung 27: Häufigkeit der Angabe (in Prozent) der drei Versuche des SLT „Elektrophysiologie“	123
Abbildung 28: Rückmeldungen der Schüler zur Benutzung der Simulationsumsetzung.....	125
Abbildung 29: Komponentenbetrachtung der Simulationsbewertung in Abhängigkeit von der Simulationsumsetzung.	127
Abbildung 30: Komponentenbetrachtung der Simulationsbewertung in Abhängigkeit vom Biologieinteresse.....	128
Abbildung 31: Komponentenbetrachtung der Simulationsbewertung in Abhängigkeit von den „Computerfähigkeiten“.....	129
Abbildung 32: Bewertung der LMS Komponenten in Abhängigkeit von der Simulationsumsetzung.	131
Abbildung 33: Bewertung der LMS Komponenten in Abhängigkeit vom Biologieinteresse.....	132
Abbildung 34: Bewertung der LMS Komponenten in Abhängigkeit von den „Computerfähigkeiten“.....	133
Abbildung 35: Bewertung der TAM Komponenten in Abhängigkeit von der Simulationsumsetzung.	136
Abbildung 36: Bewertung der TAM Komponenten in Abhängigkeit vom Biologieinteresse.....	137
Abbildung 37: Bewertung der TAM Komponenten in Abhängigkeit von den „Computerfähigkeiten“.....	138
Abbildung 38: Vorgeschlagenes theoretisches Strukturmodell des TAM	144
Abbildung 39: Strukturgleichungsmodell des TAM mit den vorgeschlagenen Einflussvariablen auf die Kernkomponenten PU und PEOU.	149

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verteilung der außerschulischen Labore auf die Bundesländer in Deutschland.....	14
Tabelle 2: Vermittlungsansätze der Neurobiologie.....	28
Tabelle 3: Vorteile von computerbasierten Simulationen oder virtuellen Lernumgebungen im Vergleich zu physischen Experimenten, mit schwerpunktmäßigem Bezug zu neurowissenschaftlichen Versuchen.....	39
Tabelle 4: Gestaltungskategorien der computerbasierten Lernumgebungen für die Vermittlung der Neurobiologie.....	43
Tabelle 5: Computerbasierte Lernumgebungen der Neurobiologie	44
Tabelle 6: Die Anzahl der neurobiologischen Versuche, die in deutschen Schülerlaboren angeboten werden.....	55
Tabelle 7: Gegenüberstellung des realen Forschungsexperiments von elektrophysiologischen Messungen an Nervenzellen und der Umsetzung des EPhys-Setups im Schülerlabor.	89
Tabelle 8: Verteilung der Stichprobengrößen.....	92
Tabelle 9: Einteilung der Schüler in Abhängigkeit von der Bewertung der Komponente „Ausgangsinteresse Biologie & Forschung“	94
Tabelle 10: Einteilung der untersuchten Gruppierungen.....	96
Tabelle 11: Komponenten des TAM.....	99
Tabelle 12: Hauptkomponentenanalyse (Korrelationsmatrix) der Feedback Items (LVE Goethe-Universität Frankfurt) der SLT.	110
Tabelle 13: Abhängigkeit der Bewertungskomponenten von den Variablen Geschlecht und Kursform	113
Tabelle 14: Vergleich der Komponente „Ausgangsinteresse Biologie & Forschung“, der Veränderung des Interesses (Item: „Der heutige Tag hat mein Interesse positiv verändert“) und der Schulnote.....	114
Tabelle 15: Abhängigkeit der retrospektiven Prä-Post-Erhebung von den Variablen Geschlecht und Kursform	119
Tabelle 16: Einzelwerte des Lernzuwachses der retrospektiven Prä-Post-Erhebung.....	122
Tabelle 17: Einschätzung und Benotung der beiden Simulationsumsetzungen.....	124
Tabelle 18: Einzelbetrachtung von Items (aus Abb. 28), die sich in ihrer Bewertung durch die beiden Untersuchungsgruppen unterscheiden.	125
Tabelle 19: Hauptkomponentenanalyse (Korrelationsmatrix) ausgewählter Items der Simulationsbewertung.....	126
Tabelle 20: Hauptkomponentenanalyse (Korrelationsmatrix) der Lab Motivation Scale Items.....	130

Tabelle 21: Hauptkomponentenanalyse (Korrelationsmatrix) des Technologieakzeptanzmodells.	135
Tabelle 22: Abhängigkeit der Komponenten von den Variablen Geschlecht und Kursform in Bezug zum Testinstrument.	139
Tabelle 23: Beurteilungskriterien (Cut-off-Werte) und Fit-Werte für das überprüfte Strukturgleichungsmodell.....	148
Tabelle 24: Bewertung der vorgeschlagenen Hypothesen des SEM.....	150
Tabelle 25: Prozentualer Anteil der befragten Lehrkräfte (n=66), die zu den genannten Themenbereichen Schülerexperimente durchführen und die Zuordnung zu den Themenfeldern des Hessischen Kerncurriculum	154
Tabelle 26: Zusammenfassung der Abhängigkeiten der untersuchten Komponenten der drei Testinstrumente (Simulationsbewertung, LMS und TAM).....	174
Tabelle 27: Bewertung der vorgeschlagenen Einflussvariablen auf die Kernkomponenten PU und PEOU des TAM.....	177
Tabelle 28: Abhängigkeiten von der Komponente PC_SE auf gruppenspezifische Unterschiede und ihr Einfluss im SEM.....	179
Tabelle 29: Korrelationszusammenhänge zwischen den Einflussvariablen des aufgestellten SEM.	181
Tabelle 30: Verteilung der Geschlechter, Kursformen und Schulformen (in Prozent) auf die Erhebungsinstrumente.....	224
Tabelle 31: Verteilung der Geschlechter, Kursformen und Schulformen (in Prozent) auf die SLT bezüglich der Feedback-Erhebung.....	224
Tabelle 32: Verteilung der Geschlechter, Kursformen und Schulformen (in Prozent) auf die Untersuchungs-Untergruppen bezüglich des SLT „Verhalten“	224
Tabelle 33: Verteilung der Geschlechter, Kursformen und Schulformen (in Prozent) auf die Untersuchungs-Untergruppen bezüglich des SLT „Summenpotenzial“	225
Tabelle 34: Verteilung der Geschlechter, Kursformen und Schulformen (in Prozent) auf die Untersuchungs-Untergruppen bezüglich des SLT „Elektrophysiologie“	225
Tabelle 35: Verteilung der Geschlechter, Kursformen und Schulformen (in Prozent) auf die Untersuchungs-Untergruppen bezüglich der Erhebungen Simulationsbewertung und LMS.....	226
Tabelle 36: Verteilung der Geschlechter, Kursformen und Schulformen (in Prozent) auf die Untersuchungs-Untergruppen bezüglich der Erhebung TAM.....	226

Danksagung

Das Herz einer **Arbeitsgruppe** ist in meinen Augen nicht nur in ihrer Forschung erkennbar, sondern vor allem in den Persönlichkeiten ihrer Mitarbeiter*innen. Ich hätte mich in keiner Gruppe wohler fühlen können. Ich danke Euch für die unvergesslichen Jahre voller schöner Momente, den steten Rückhalt und die große Hilfsbereitschaft.

Allen voran danke ich meinem Professor **Dr. Paul Dierkes** für die Möglichkeit, die Arbeit unter seiner stets unterstützenden Betreuung durchzuführen sowie für die vielen hilfreichen Diskussionen, Hilfestellungen und Ideen. Paul, ich danke dir für dein großes Vertrauen in meine Arbeit und in meine Person und dem damit verbundenen Raum für meinen eigenen Weg.

Alena, meine Verkörperung für „wenn aus Kollegen Freunde werden“. **Matthias**, die (Natur-)Verbundenheit zu dir müssen wir nicht diskutieren. **Basti, Anna Lena, Christian**, jede (Statistik-)Diskussion hat mich weitergebracht; ihr hattet stets ein offenes Ohr, es war immer wieder „*Magic*“. **Nadja, Kirsten** und **Daphné**, die besten HiWis, ohne euch wäre es nicht gegangen. Ich danke euch für eure uneingeschränkte Unterstützung bei der Konzeption und Durchführung der Labortage, die von vielen eurer Ideen profitierten. **Marvin**, dein Support im neuen Projekt hat mir den Rücken freigehalten.

Ich möchte mich ebenfalls bei Herrn Professor **Dr. Andreas Christian** bedanken, für die freundliche Bereitschaft, sich meiner Arbeit als Zweitgutachter anzunehmen. Danke Andreas, dass du damit verbunden auch die Reise nach Frankfurt auf dich nimmst.

Danke **Niko Schneider** für die spontane Umsetzung der Kontrollgruppen Programmierung – quasi über Nacht und deinen Support bei jeglichem scheinbar unlösbar IT-Problem.

Die großzügige finanzielle Förderung der **Gemeinnützigen Hertie-Stiftung** hat nicht nur 2.626 Schüler*innen die Möglichkeit eröffnet, das „Schülerlabor Neurowissenschaften“ zu besuchen, sondern hat auch mir die Gelegenheit gegeben, ein so wundervolles Projekt zu verwirklichen und in diesem Rahmen meine Dissertation durchführen zu können. Dafür und für das große Engagement der Stiftung möchte ich mich recht herzlich bedanken. Besonders hervorzuheben ist der Projektbetreuer Herr **Dr. Alexander Lehmann** – danke für 4 Jahre tolle unterstützende Zusammenarbeit. Gerne wieder.

Eine **Familie** ist das größte Geschenk im Leben. **Mama, Papa, Stefan, Markus, Bella**, eure liebevolle umfassende Unterstützung in allen Höhen und Tiefen meines Lebens haben mich maßgeblich hierher gebracht. Ihr habt immer an mich geglaubt. Mama – beste Lektorin – ich danke dir für deine umfangreichen unermüdlichen Korrekturlesungen. Ohne dich wäre kein Komma da, wo es sein sollte, und manche Verzweiflung wäre nicht aufgefangen worden.

Björn, ich danke dir von Herzen für deine bedingungslose Unterstützung, deinen Optimismus, dein Verständnis und dein Vertrauen in mich.

Was wäre ein Schülerlabor ohne **Schüler**? Ich danke allen Schüler*innen und ihren Lehrkräften für die Bereitschaft, an den Studien teilzunehmen und damit verbunden für den Einsatz ihrer Zeit. Vor allem aber danke ich euch für euer Vertrauen, euch unterrichten zu dürfen, euch auf meine Konzepte einzulassen und für viele schöne gemeinsam erlebte Momente. Ihr habt mir gezeigt, was mir so viel Freude bereitet.

Für meine Nichte Anna Bayesh

Jeder Moment mit dir füllte stets wieder meine Reserven. Deine Kinderseele schenkt mir einen Zugang zu Unbeschwertheit, Begeisterungsfähigkeit und lenkt den Blick stets wieder auf das Wesentliche.

Lebenslauf

Sandra Anna Christine Zimmermann

Geboren am 23.05.1987 in Marburg an der Lahn

Berufserfahrung

Seit 01.01.2019	Externe Mitarbeiterin der Abteilung für Didaktik der Biowissenschaften, Goethe-Universität, Frankfurt
01.08.2014 – 31.12.2018	Wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung für Didaktik der Biowissenschaften, Goethe-Universität, Frankfurt
01.05.2013 – 30.07.2014	Wissenschaftliche Hilfskraft in der Abteilung für Didaktik der Biowissenschaften, Goethe-Universität, Frankfurt
16.11.2012 – 15.03.2013	Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Bienenkunde, Goethe-Universität, Frankfurt

Studium

Oktober 2012:	Diplom im Studienfach Biologie , Fachrichtung Neurowissenschaften Goethe-Universität Frankfurt, Abschlussnote: 1,3 Diplomarbeit: „Umlernen und seitenspezifische olfaktorische Konditionierung bei der Honigbiene (<i>Apis mellifera</i>)“, Institut für Zellbiologie und Neurowissenschaften, Arbeitsgruppe Neurobiologie der Honigbiene / Oberursel.
2006 – 2012:	Biologie Studium an der Goethe Universität Frankfurt Schwerpunktfächer im Hauptstudium: Neurobiologie, Tierphysiologie, Psychologie Praktika: Neurobiologisches Praktikum im Arbeitskreis Neurophysiologie am Neuroscience-Center, Frankfurt (8 Wochen). Tierphysiologisches Praktikum im Arbeitskreis Neurobiologie und Biosensorik, Goethe-Universität Frankfurt (8 Wochen).

Schulbildung

1997 – 2006:

Martin-Luther-Gymnasium, Marburg

Abschluss: Allgemeine Hochschulreife, Abschlussnote: 1,8

Akademische Tätigkeiten

- Anthropologisch **Humanbiologisches Praktikum für Lehramtsstudierende**, Didaktik der Biowissenschaften, Goethe-Universität Frankfurt
 - Mitarbeit bei der Überarbeitung und Neukonzeption der Lehr- und Arbeitsmaterialien; Mitarbeit bei der Durchführung.
- **Fachdidaktische Exkursion** „Verhaltensbiologie in zoologischen Gärten“, Arnheim (NL), Didaktik der Biowissenschaften, Goethe-Universität Frankfurt
 - Betreuung der Studentenprojekte im Bereich Verhaltensforschung; Erstellung des Exkursionsbandes.
- **Pilotprojekt „BSc meets E“** in Kooperation mit dem Gymnasium Oberursel, Institut für Bienenkunde, Goethe-Universität Frankfurt
 - Konzeption und Erstellung der Lehrmaterialien zur Neurobiologie; Organisation und Durchführung.
- **Schülerlabortag „Evolution des Menschen“**, Didaktik der Biowissenschaften, Goethe-Universität Frankfurt
 - Überarbeitung und Durchführung unter Einsatz moderner anthropologischer Forschungsmethoden (David-Linienlaser 3D-Scansystem).
- **Goethe-Lab – ScienceWeek**, „Mobilität - bewegt kluge Köpfe“, Teilprojekt: „**Biomechanik**“, Interdisziplinäres Projekt der Goethe-Universität Frankfurt
 - Mitarbeit bei der Konzeption physiologischer Experimentierstationen; Erstellung der Lehrmaterialien und Durchführung.
- **Schülerlabor Neurowissenschaften**, Didaktik der Biowissenschaften, Goethe-Universität Frankfurt (www.goethe-biolab.de)
 - Konzeption von sechs Schülerlabortagen im Bereich der Neurowissenschaften für alle Jahrgangsstufen; Erstellung der Lehrmaterialien und Durchführung mit begleitender fachdidaktischer Forschung.

Publikationen

- Zimmermann, S.; Dierkes, P. (2019): Pore auf und wieder zu. Liganden-aktivierte Ionenkanäle im simulierten Forschungsexperiment. *Unterricht Biologie – Friedrich Verlag* 441: 24-29.
- Zimmermann, S.; Greßler, A.; Dierkes, P. (2019): Ich sehe, was du fühlst. Eyetracker-Daten analysieren und bewerten. *Unterricht Biologie Friedrich Verlag* 441: 18-23.
- Greßler, A.; Dierkes, P.; Zimmermann, S. (2019): Ganz schön komplex. Strukturelle Vielfalt von tierischen Zellen und Geweben kennenlernen. *Unterricht Biologie – Friedrich Verlage* 441: 12-17.
- Greßler, A.; Zimmermann, S.; Weislogel, K.; Pfeiffer, M.; Fingerhut, M.; Klauer, G.; Krömker, D.; Dierkes, P. (2017): Virtuelle Mikroskopie – Eine Zukunftsperspektive für den Biologieunterricht in der Schule? *Journal für Didaktik der Naturwissenschaften und der Mathematik* 1: 20-34.
- Klees, G.; Wilhelm, T.; Heim, C.; Zimmermann, S.; Wenzel, M. (2016): Biomechanik fächerübergreifend. Der Körper in Bewegung. *MNU* 4: 228-234.
- Zimmermann, S.; Dierkes, P. (2015): Film ab... Dokumentationsfilme analysieren und selbst gestalten. *Unterricht Biologie – Friedrich Verlag* 402/403: 26-28.
- Zimmermann, S.; Dierkes, P. (2015): Wie gelangt der fossile Fund in den Computer? *Unterricht Biologie – Friedrich Verlag* 402/403: 29-32.
- Klees, G.; Zimmermann, S.; Dierkes, P. (2015): Technik, die verbindet – Kunst trifft Biologiedidaktik. *L-News* 02/15: 21-22.

Poster-Beiträge

- Zimmermann, S.; Dierkes, P. (2018): Neurobiologische Forschung für SchülerInnen im Experiment erfahrbar machen. *Konferenz: 13. LeLa-Jahrestagung, Kiel.*
- Zimmermann, S.; Greßler, A.; Dierkes, P. (2017): Neurowissenschaften mit innovativen Methoden im Schülerlabor vermitteln. *Konferenz: 12. LeLa-Jahrestagung, Würzburg.*
- Greßler, A.; Zimmermann, S.; Dierkes, P. (2016): Virtuelle Mikroskopie – Eine Perspektive für den Biologieunterricht in der Schule. *18. Internationale Frühjahrsschule der Fachsektion Didaktik der Biologie, Weinheim.*
- Zimmermann, S.; Dierkes, P. (2015): Paläoanthropologische Forschungsmethoden im Schülerlabor – Wie gelangt der fossile Fund in den Computer? *10. LeLa-Jahrestagung, Berlin.*
- Greßler, A.; Zimmermann, S.; Dierkes, P. (2015): Virtuelle Mikroskopie – Eine Perspektive für den Biologieunterricht in der Schule. *10. LeLa-Jahrestagung, Berlin.*

- Zimmermann, S.; Schützmann, V.; Grünewald, B. (2013): Side-specific olfactory learning in the honeybee: localization and dynamics of memory retention. *60. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft der Institute für Bienenforschung e. V., Würzburg.*
- Zimmermann, S.; Grünewald, B. (2012): Side-specific olfactory learning in the honeybee: extinction and reversal conditioning. *2. Biennial meeting of the rhine-main neuroscience network (rmn²), Oberwesel.*

EDV-Kenntnisse

Microsoft Office; Adobe Creative Suite; SPSS; AMOS

Sprachkenntnisse

Englisch Verhandlungssicher; Französisch Grundkenntnisse

Erklärung und Versicherung

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich mich bisher keiner Doktorprüfung im Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Bereich unterzogen habe.

Frankfurt am Main, den _____

Unterschrift

Versicherung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorgelegte Dissertation über

„Schülerlabor Neurowissenschaften –

Ein biomedizinisches Forschungs- und Entwicklungsprojekt für die Oberstufe in einer außerschulischen Lernumgebung“

selbstständig angefertigt und mich anderer Hilfsmittel als der in ihr angegebenen nicht bedient habe, insbesondere, dass alle Entlehnungen aus anderen Schriften mit Angabe der betreffenden Schrift gekennzeichnet sind.

Ich versichere, die Grundsätze der guten wissenschaftlichen Praxis beachtet und nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsvermittlung in Anspruch genommen zu haben.

Frankfurt am Main, den _____

Unterschrift