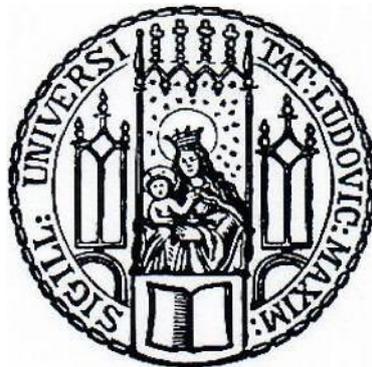


---

# TPACK, Akzeptanz und Fortbildungen von Lehrkräften zu Multimediaanwendungen im Physikunterricht

Peter Mayer

---



München 2022

---

# **TPACK, Akzeptanz und Fortbildungen von Lehrkräften zu Multimediaanwendungen im Physikunterricht**

Peter Mayer

---

## **Dissertation**

an der Fakultät für Physik  
der Ludwig-Maximilians-Universität  
München

vorgelegt von:  
**Peter Mayer**  
aus Höslwang

München, den 03.11.2022

Erstgutachter: **Prof. Dr. Raimund Girwidz**

Zweitgutachterin: **Jun. Prof. Dr. Bianca Watzka**

Tag der mündlichen Prüfung: **Mittwoch, 21.12.2022**



## 1. INHALTSVERZEICHNIS

1.	Inhaltsverzeichnis.....	5
2.	Zusammenfassung.....	7
3.	Einleitung.....	9
4.	Grundlagen des technologiegestützten Lernens.....	13
4.1	Akzeptanz von Multimediaanwendungen .....	15
4.1.1	Akzeptanz – Historische Entwicklung.....	16
4.1.2	Akzeptanz – Begriffserklärung und Definition.....	17
4.1.3	Akzeptanzmodelle zu Einstellungen und Verhalten.....	20
4.1.4	Das Technologieakzeptanzmodell von Davis.....	23
4.1.5	Modellerweiterung – vom TAM zur UTAUT .....	29
4.1.6	Grenzen des TAM und des UTAUT-Modells .....	31
4.2	Das TPACK.....	33
4.2.1	Beschreibung und Modellierung .....	33
4.2.2	Lehr-Lern-Umgebungen in einer digitalisierten Welt .....	36
4.2.3	Grenzen des TPACK-Frameworks .....	38
4.3	Multimedia im Unterricht .....	41
4.3.1	Multimedia und multimediales Lernen .....	41
4.3.2	Multimedia im Bildungsbereich .....	42
4.3.3	Multimedia im Unterricht .....	43
4.3.4	Theorie zum multimedialen Lernen nach Mayer .....	49
4.3.5	Cognitive Load Theory .....	51
4.3.6	Multiple Repräsentationen .....	55
5.	Relevante Komponenten für das Konzept einer Lehrerfortbildung.....	57
5.1	Integration des theoretischen Rahmens .....	58
5.1.1	Adaption des UTAUT-Modells .....	59
5.1.2	Erweiterung des Basismodells.....	60
5.1.3	Die Fortbildungsveranstaltung .....	62
5.2	Workshop für und mit Lehrkräften .....	63
5.2.1	Fortbildungskonzept.....	63
5.2.2	Struktur einer zielgerichteten Fortbildungsveranstaltung .....	64
5.2.3	Ablauf des Workshops.....	65

5.3	PUMA@LMU .....	80
5.3.1	Videoanalysen in der Lehrerausbildung .....	81
5.3.2	Vertonung von Stummfilmen in der Lehrerausbildung.....	82
5.3.3	Neue Möglichkeiten der Kompetenzförderung an Schulen .....	83
5.3.4	Videovertonung und -analyse im Schulunterricht .....	85
5.3.5	Folien zur Präsentation.....	89
5.3.6	Einstiegsfolien/Tutorial .....	90
5.4	Fortbildungsmodul zur Astrophysik .....	94
5.4.1	Didaktischer Rahmen .....	95
5.4.2	Veranschaulichung der Sternentwicklung mit Hilfe des Hertzsprung-Russel-Diagramms (HRD)	99
5.4.3	Veränderliche Sterne vom Typ der Cepheiden .....	107
5.4.4	Supernovae vom Typ Ia .....	115
6.	Empirischer Teil zum Fortbildungskonzept .....	134
6.1	Stichprobe .....	136
6.2	Teilstudie 1 – TAM2/UTAUT und Erweiterung .....	136
6.2.1	Forschungsfragen – Teilstudie 1.....	136
6.2.1	Methodik .....	140
6.2.2	Ergebnisse – Teilstudie 1 .....	151
6.2.3	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse – Teilstudie 1.....	160
6.3	Teilstudie 2 – Fortbildungsveranstaltung.....	165
6.3.1	Welches Wissen benötigen Lehrkräfte hinsichtlich Multimediaanwendungen?.....	165
6.3.2	Forschungsfragen und Hypothesen.....	166
6.3.3	Methodik .....	168
6.3.4	Ergebnisse – Teilstudie 2 .....	172
6.3.5	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse – Teilstudie 2.....	175
6.3.6	Grenzen .....	176
7.	Ausblick .....	178
8.	Literaturverzeichnis.....	181
9.	Abbildungsverzeichnis.....	207
10.	Tabellenverzeichnis .....	210
11.	Anhang .....	211

## 2. ZUSAMMENFASSUNG

Welche Faktoren führen dazu, dass Lehrkräfte multimediale Werkzeuge im Physikunterricht akzeptieren? Diese Frage lässt sich weder einfach noch eindeutig beantworten. Die Einflussfaktoren sind mannigfaltig und reichen von individuellen Einstellungen sowie dem technologischen und pädagogischen Wissen einer Lehrkraft bis hin zu den nicht beeinflussbaren institutionellen Rahmenbedingungen wie z. B. dem Lehrplan oder der technischen Ausstattung der individuellen Schule. Erfolgsversprechend scheint jedoch insbesondere die Berücksichtigung von Faktoren, die die persönlichen Einstellungen bezüglich Multimedia beeinflussen. Nach dem UTAUT-Modell (UTAUT = *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology*) zählen zu diesen Faktoren die persönliche Relevanzeinschätzung, die Einfachheit der Bedienung und der erwartete Nutzen einer Technologie. Das UTAUT-Modell deckt jedoch nicht das für eine Lehrkraft relevante pädagogische, technologische oder das inhaltsbezogene, also physikalische Wissen (engl. *Technological Pedagogical And Content Knowledge*; TPACK) ab. Dieses Wissen benötigen Lehrkräfte jedoch für einen gezielten Unterrichtseinsatz multimedialer Anwendungen, weshalb in der vorliegenden Arbeit das UTAUT-Modell um diese Faktoren erweitert wird. Dadurch kann zudem herausgefunden werden, ob und wie das Akzeptanzverhalten von Lehrkräften gegenüber Multimediaanwendungen im Physikunterricht beeinflusst werden kann, wenn das didaktisch-inhaltliche Wissen (TPACK) bezüglich multimedialer Anwendungen durch eine Lehrerfortbildung gefördert wird. Da aus der Theorie bekannt ist, dass Lehrerfortbildungen insbesondere dann von Erfolg gekrönt sind, wenn die Fortbildungsinhalte auf konkrete Fachinhalte gestützt sind, werden in der angebotenen Fortbildung neben den theoretischen Grundlagen auch konkrete Unterrichtsbeispiele vorgestellt.

Im Rahmen der durchgeführten Studie wurden insgesamt fünf Forschungsfragen adressiert, deren Beantwortung in zwei Phasen der Untersuchung erfolgte. In der ersten Phase wurden zwei Forschungsfragen untersucht, die sich auf die Adaption des UTAUT-Modells an den schulischen Kontext und die Anwendung auf Multimediaanwendungen sowie die Erweiterung des Modells um die Komponente des TPACK beziehen. Ziel war es, herauszufinden, welchen Einfluss die einzelnen Faktoren des erweiterten und adaptierten Modells auf die Akzeptanz von Multimediaanwendungen im Physikunterricht haben. In der zweiten Phase wurden drei Forschungsfragen untersucht, die sich auf die Anwendbarkeit des adaptierten und erweiterten Modells in der Praxis beziehen. Hierzu wurde das Modell in einem Prä-Postdesign im Rahmen einer Reihe von Fortbildungsveranstaltungen angewandt. Dafür wurden 22 identische, zweiteilige Fortbildungsveranstaltungen mit insgesamt 174 Physiklehrkräften durchgeführt, wobei jede Fortbildungsveranstaltung aus einem theoretischen und einem praktischen Teil bestand.

Im theoretischen Teil sollten die Lehrkräfte einen Überblick über aktuelle Forschungsergebnisse bezüglich der Verwendung multimedialer Inhalte im Physikunterricht erhalten, um so gezielt das pädagogische Wissen bezüglich Multimediaanwendungen fördern zu können. Dabei ging diese Fortbildung über die Konzepte von Richard Mayer hinaus und lieferte zusätzlich konkrete Unterrichtsbeispiele, wodurch eine Steigerung des pädagogischen Inhaltswissens angestrebt wurde. Bei einigen der vorgestellten Unterrichtskomponenten handelt es sich um neu entwickelte webbasierte Anwendungen zum Einsatz im astrophysikalischen Unterricht der zwölften Jahrgangsstufe, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind. Mit diesen Komponenten wurde demonstriert, wie originale Forschungsdaten, beispielsweise der Gaia-Mission der ESA oder des Open-Astronomy-Catalog, im Bereich der Entfernungbestimmung innerhalb unserer Galaxie im Universum eingesetzt werden können. Dabei kamen verschiedene Konzepte für Multimediaanwendungen wie Multikodierung oder auch multiple Repräsentationen innerhalb mehrerer onlinebasierter Anwendungen zum Einsatz, um die komplexen Zusammenhänge in didaktisch optimierter Form zu präsentieren.

Im Praxisteil sollte gezielt das technologisch-pädagogische sowie das technologische Wissen einer Lehrkraft gefördert werden, indem diese selbständig konkrete Unterrichtsbeispiele ausarbeitet. Hierfür kam ein im Rahmen dieser Arbeit speziell für den Physikunterricht neu entwickeltes webbasiertes Autorentool zum Einsatz: PUMA@LMU. Dieses beinhaltet neue Funktionalitäten, die zum Teil innovative Aufgabentypen ermöglichen. Zudem enthält PUMA@LMU eine umfangreiche Datenbank mit zahlreichen Simulationen, Animationen, Videos und vielen anderen multimedialen Inhalten, die im Physikunterricht

eingesetzt werden können. Insgesamt sollte es den Lehrkräften damit erleichtert werden, geeignete Inhalte für den Unterricht zu finden und diese in ihren Unterricht zu integrieren.

In Phase 1 der Untersuchung konnte zunächst festgestellt werden, dass das TPACK als übergeordnete Moderatorvariable zu den Konstrukten ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘, ‚persönliche Relevanzeinschätzung‘ und ‚wahrgenommener Nutzen für Schülerinnen und Schüler‘ des UTAUT Modells von Davis fungiert. Die Varianzaufklärung des Konstruktes ‚Akzeptanzverhalten‘ steigt durch diese Erweiterung deutlich auf 34 % (+14 %). Ferner konnte gezeigt werden, dass das TPACK einen signifikanten Einfluss auf das Akzeptanzverhalten gegenüber Multimediaanwendungen besitzt.

In Phase 2 der Untersuchung konnte belegt werden, dass das TPACK von Lehrkräften durch eine derartige Fortbildung signifikant und mit hoher Effektstärke gesteigert werden kann (Wilcoxon-Test:  $z = -6.157$ ,  $p < .001$ ,  $n = 165$ , Cohens  $d = -1.084$ ). Dabei wurde festgestellt, dass sich die Menge der Teilnehmenden anhand ihrer Vorerfahrungen zum Einsatz von Multimedia im Physikunterricht in drei nahezu gleich große Gruppen einteilen lässt (wenig, mittelmäßige und große Vorerfahrung). Die Steigerung des TPACK führt jedoch nicht gleichermaßen in allen Vorerfahrungsgruppen zur erwarteten Steigerung des Akzeptanzverhaltens.

Wird das Akzeptanzverhalten gegenüber Multimedia im Physikunterricht vor der Intervention als Kovariate angenommen, lässt sich ein signifikanter Zusammenhang der Vorerfahrungsgruppen mit der Akzeptanz nach der Fortbildung beobachten ( $F(1, 161) = 10.714$ ,  $p = .001$ ,  $part. \eta^2 = .170$ ). Weiterhin zeigt sich ein signifikanter Effekt der Vorerfahrungsgruppen auf die Akzeptanz nach der Fortbildung ( $F(2, 161) = 4.455$ ,  $p < .05$ ,  $part. \eta^2 = .052$ ). Anhand geplanter Kontraste wird deutlich, dass Teilnehmende in der Gruppe mit mittelmäßig ausgeprägter Vorerfahrung nach der Fortbildung eine im Vergleich zur Gruppe mit den erfahrenen Teilnehmenden signifikant höhere Akzeptanz aufweisen ( $p < 0.01$ , 95 %  $CI = [.146, .728]$ ). Außerdem unterscheidet sich auch die Gruppe der vorab unerfahrenen Teilnehmenden signifikant von der Gruppe der vorab erfahrenen Teilnehmenden hinsichtlich der Akzeptanz nach der Fortbildung ( $p < 0.05$ , 95 %  $CI = [.119, 1.063]$ ). Dabei kann bei der Gruppe der unerfahrenen Teilnehmer eine deutlich stärkere Akzeptanzsteigerung beobachtet werden. Insgesamt kann daher konstatiert werden, dass durch eine für das TPACK förderliche Fortbildung auch eine Veränderung in der Akzeptanz von Multimediaanwendungen im Physikunterricht erreicht werden kann. Somit ist das Modell, das dieser Arbeit zugrunde gelegt wurde, gut nutzbar und hilft, das Akzeptanzverhalten für Multimediaanwendungen im Physikunterricht zu erklären. Es kann genutzt werden, um die Effektivität von Lehreraus- und Lehrerfortbildungsveranstaltungen hinsichtlich der Steigerung des Akzeptanzverhaltens von Multimediaanwendungen zu untersuchen, die Weiterentwicklung der Anwendungen zu unterstützen und so einen Beitrag zur Qualitätssteigerung von Aus- und Fortbildungsveranstaltungen zu leisten.

### **3. EINLEITUNG**

Mit dem Einzug von Computern, Tablet-PCs und Smartphones – nicht nur in den Alltag von Lehrkräften sowie Schülerinnen und Schülern, sondern auch in die Arbeitswelt von heute – nimmt die Bedeutung digitaler Medien weiter stetig zu. Diesem Wandel in Wirtschaft und Gesellschaft kann und darf sich die Schule nicht verschließen. Aus diesem Grund wurden nach den Beschlüssen der Kultusministerkonferenz (KMK) von 2005 die institutionellen Rahmenbedingungen an den Schulen neugestaltet. Seither stiegen die jährlichen öffentlichen Ausgaben für Bildung in Deutschland von 87 Mrd. € im Jahr 2005 auf 165 Mrd. € im Jahr 2021. Nicht nur im Rahmen des Digitalpakts Schule (2019) wurde seither viel Geld in die Modernisierung der Medienausstattung der Schulen, unter anderem mit Computern, Beamern und interaktiven Whiteboards, investiert, sodass diese modernen Technologien von Lehrkräften inzwischen schneller und unkomplizierter eingesetzt werden können. Gleichzeitig mit der technischen Modernisierung wächst auch die Zahl onlinebasierter multimedialer Inhalte, die den Unterricht unterstützen können. Hierzu zählen sowohl kommerzielle Angebote von Verlagen und anderen im Bildungsbereich tätigen Unternehmen als auch kostenlose Angebote, die häufig von Lehrkräften selbst, von Bildungsinstituten, Stiftungen oder auch von staatlichen Organisationen wie Universitäten oder Forschungseinrichtungen zur Verfügung gestellt werden. Daneben gibt es zahlreiche webbasierte Anwendungen, die es ermöglichen, den Schülerinnen und Schülern diese unterschiedlichen Angebote aus verschiedenen Quellen auf einer gemeinsamen übergreifenden Plattform zugänglich zu machen. Derartige Plattformen stellen aber meist nur den Rahmen für die Präsentation der Inhalte zur Verfügung (vgl. moodle). Pajo und Wallace (2001) betonen in ihrer Studie, dass eine erfolgreiche Integration von Technologien in den Unterricht nicht nur von deren Verfügbarkeit abhängt, sondern auch davon, wie Lehrkräfte sie annehmen, also ob diese die neuen Möglichkeiten auch tatsächlich als gewinnbringende Erweiterung des herkömmlichen Unterrichts akzeptieren. In zahlreichen Studien konnte zwar ein positiver Effekt auf den Lernerfolg nachgewiesen werden, wenn multimediale Anwendungen im Unterricht geeignet eingesetzt werden. Dennoch ist die Akzeptanz derartiger Anwendungen unter den Lehrkräften teils gering. Folglich müssen weitere Einflussfaktoren auf die Akzeptanz multimedialer Anwendungen existieren. In Unterkapitel 4.1.4 dieser Arbeit wird sich daher mit dem wohl am weitesten verbreiteten Modell zur Akzeptanzuntersuchung von neuen, digitalen Technologien, dem Technologieakzeptanzmodell (TAM) von F. D. Davis et al. (1989), sowie einigen davon abgeleiteten Modellen beschäftigt, um so weitere Einflussfaktoren aufzeigen zu können. In der Literatur finden sich jedoch weder empirische Erkenntnisse zur Anwendbarkeit des TAM und dessen adaptierten Modellen auf Multimediaanwendungen im Physikunterricht noch auf die mit ihnen

einhergehenden Wirkzusammenhänge. Deshalb soll im Zentrum dieser Arbeit die Untersuchung der Akzeptanz multimedialer Anwendungen im Physikunterricht stehen. Hierzu wird das TAM an den schulischen Kontext angepasst. Zusätzlich werden dem Modell weitere schulspezifische Einflussgrößen hinzugefügt. Dies ist notwendig, da zusammen mit der Modernisierung der technischen Ausstattung und den gewachsenen digitalen Angeboten für Lehrkräfte auch die Anforderungen an ebendiese gestiegen sind. Dies gilt insbesondere in den Naturwissenschaften. Heute müssen naturwissenschaftliche Lehrkräfte neben dem herkömmlichen Experimentieren auch solide Computerkenntnisse besitzen, damit computergestützte Messwerterfassungen, Simulationen, Animationen oder auch Videos zielgerichtet in den Unterricht eingebunden werden können. Hierzu wird beispielsweise auch Wissen darüber benötigt, welche Auswirkungen der Einsatz einer spezifischen Multimediaanwendung auf den Lernvorgang hat. Einerseits bieten multimediale Inhalte zahlreiche Vorteile beispielsweise für den Wissensaufbau sowie die Vernetzung des neu erlangten Wissens. Andererseits steigt dadurch auch die kognitive Belastung bei den Schülerinnen und Schülern an, wenn diese bei einem ungeeigneten Einsatz mit Reizen überflutet werden und so keine kognitiven Ressourcen für den eigentlichen Lerngegenstand mehr aufgewendet werden können. Eine Lehrkraft muss also beispielsweise auch wissen, wie derartige Überlastungen vermieden werden können. Dieses vielschichtige zusätzliche Wissen, das für eine fortschreitende Professionalisierung von Physiklehrkräften nötig ist, wird in der modernen Bildungsforschung als *Technological Pedagogical and Content Knowledge* (kurz TPACK) oder zu Deutsch als ‚Technologisch-Pädagogisches Inhaltswissen‘ einer Lehrkraft bezeichnet (Mishra & Koehler, 2006). Deshalb soll in dieser Arbeit auch untersucht werden, welchen Einfluss dieses zusätzliche Wissen auf die Akzeptanz von Multimediaanwendungen im Physikunterricht hat. Hierzu wird das adaptierte Technologieakzeptanzmodell um den Faktor TPACK erweitert und dessen Validität im Rahmen einer Reihe von Lehrerfortbildungen für Physiklehrkräfte überprüft. Zudem wird eine zweite Teilstudie durchgeführt. Mit der darin enthaltenen Lehrerfortbildung soll das TPACK gezielt gefördert werden, um so Rückschlüsse auf die Veränderung der Akzeptanz von Multimediaanwendungen im Physikunterricht ziehen zu können.

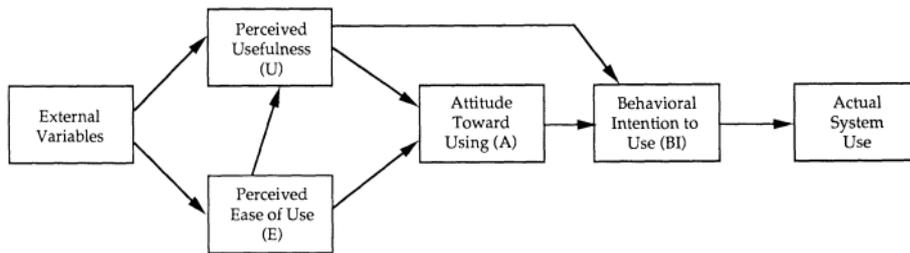


## **4. GRUNDLAGEN DES TECHNOLOGIEGESTÜTZTEN LERNENS**

In den aktuellen Lehrplänen wird neben der besseren digitalen Bildung der Schülerinnen und Schüler auch die Förderung unterschiedlichster Kompetenzen verstärkt ins Zentrum der schulischen Aktivitäten gerückt. Lehrkräfte sollen dazu angehalten werden, vermehrt digitale Medien im Unterricht einzusetzen. Deshalb werden für Lehrkräfte neben dem fachlichen und dem pädagogischen Wissen auch die Kenntnisse über verschiedene Technologien und über deren spezifische Auswirkungen auf den Lehr-Lern-Prozess an Bedeutung zunehmen. Nach Idcgatekiva und Lindner (2015) benötigen Lehrkräfte hierfür jedoch spezifische Aus- und Fortbildungsmaßnahmen, um beispielsweise Multimediainhalte in den naturwissenschaftlichen Unterricht zielgerichtet integrieren zu können. Nach dieser Studie geben etwa 58 % der Lehrkräfte als Grund für den geringen Einsatz von Multimedia im Unterricht an, selbst zu wenig Erfahrung im Umgang mit Multimedia im Unterricht zu haben. Sie lässt ferner den Schluss zu, dass Lehrkräfte Multimedia im Unterricht noch nicht vollumfänglich als mögliche Technologie akzeptiert haben.

In der vorliegenden Arbeit sollen daher schulspezifische Einflussfaktoren auf die Akzeptanz untersucht werden, wobei es gilt, eine Möglichkeit aufzuzeigen, wie diese gesteigert werden kann. Hierzu wird in Unterkapitel 4.1.2 zunächst das Konstrukt der Akzeptanz diskutiert. Dabei wird deutlich, dass es wegen des sowohl wissenschaftlichen als auch außerwissenschaftlichen Gebrauchs des Akzeptanzbegriffs und aufgrund der zahlreichen wissenschaftlichen Strömungen, in denen die Akzeptanz jeweils für sich untersucht wird, keine allgemeingültige Definition für dieses Konstrukt gibt. Für den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit wird daher eine Definition gewählt, die sich an der aktuellen Akzeptanzforschung orientiert und in der die Akzeptanz durch die Aspekte der Einstellungs- sowie der Verhaltensakzeptanz bestimmt wird. Für die Untersuchung der Beziehungen zwischen den kognitiven Einflussfaktoren und dem Akzeptanzverhalten wird das auf dem Technologieakzeptanzmodell von F. D. Davis (1986; F. D. Davis, 1989) basierende UTAUT-Modell (= TAM2) gewählt, das gemeinhin als das am häufigsten verwendete und empirisch am besten bestätigte Modell zur Akzeptanzuntersuchung gilt (vgl. Olbrecht, 2010, S. 30 f.).

In Abschnitt 4.2 wird ein Augenmerk auf das Technological, Pedagogical, and Content Knowledge (TPACK) gelegt. Hierbei handelt es sich um ein Modell, das aus den verschiedenen Wissensbereichen besteht, die jeweils die Kompetenzen beschreiben, die Lehrkräfte in der Ausbildung im 21. Jahrhundert entwickeln sollten, um z. B. digitale Technologien erfolgreich in Lehr- und Lernprozesse integrieren zu können (M. J. Koehler et al., 2014; Kopcha et al., 2014). In Abschnitt 4.3 wird schließlich unter anderem die Theorie zum multimedialen Lernen von Richard R. E. Mayer (2001) beleuchtet.



**Abbildung 1: Technology Acceptance Model (TAM) (Davis, Bagozzi & Warshaw, 1989, S. 985).**

## 4.1 Akzeptanz von Multimediaanwendungen

Im heutigen Informationszeitalter sind Informationen durch Smartphones und Co. zu jeder Zeit und an jedem Ort zugänglich. In den vergangenen Jahren haben verschiedenste Informationstechnologien Einzug in den Alltag der Schülerinnen und Schüler, aber auch der Lehrkräfte gehalten. Angesichts dieses rasanten technologischen Fortschritts und der damit zusammenhängenden gesellschaftlichen Entwicklung muss sich die Schule weiterentwickeln. Dies zeigt sich bereits im derzeit stattfindenden Wechsel vom klassischen lehrer- hin zum schülerzentrierten Unterricht (Lee et al., 2009). Vor allem von jungen Lehrkräften, die selbst zu den ‚Digital Natives‘ gezählt werden, wird erwartet, dass sie die Möglichkeiten, die ihnen Multimediainhalte sowohl online als auch offline bieten, zielgerichtet in den Unterricht einbinden (vgl. Hussein, 2015). Im Rahmen verschiedener Studien wurde herausgefunden, dass Schülerinnen und Schüler den Einsatz von Multimedia im Unterricht nicht nur akzeptieren, sondern sogar gezielt bevorzugen (Buzzard et al., 2011). Jedoch setzen Lehrkräfte Multimedia scheinbar nur zögerlich im Unterricht ein. Hierfür fanden Idcgatekiva und Lindner (2015) auf Basis einer Befragung von Biologielehrkräften verschiedene Gründe heraus: So gaben 83 % der befragten deutschen Biologie-Lehrkräfte an, hierfür zu wenig Zeit zu haben, und 58 % nannten einen Mangel an Erfahrungen mit Multimedia als Grund für einen geringen Einsatz im Unterricht. Gleichzeitig wurde in dieser Studie offensichtlich, dass Lehrkräfte die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten nicht voll ausschöpfen und stattdessen weiterhin herkömmliche Präsentationsmethoden verwenden. Idcgatekiva und Lindner folgern daraus, dass Lehrkräfte eine bessere Ausbildung zum Umgang mit Multimedia benötigen. Daneben könnte diese Studie ein Indiz dafür sein, dass Lehrkräfte den Einsatz von Multimedia im Unterricht noch nicht vollumfänglich akzeptieren, denn nach dem im folgenden Abschnitt beschriebenen Technologieakzeptanzmodell von F. D. Davis (1986; F. D. Davis, 1989; F. D. Davis et al., 1989; Venkatesh & Davis, 2000) geht dem Einsatz von Multimedia immer eine grundlegende Akzeptanz von Multimedia im Unterricht voraus.

Der Begriff der Akzeptanz findet in nahezu allen gesellschaftlichen Bereichen immer dann Anwendung, wenn es darum geht, eine von einem Akzeptanzobjekt<sup>1</sup> abhängige Verhaltensweise oder Einstellung zu erklären. Als Akzeptanzobjekte gelten beispielsweise technische, unternehmerische, organisatorische, institutionelle und soziale Innovationen oder auch Veränderungen in den jeweiligen Bereichen. Nach Lücke (1995) lässt sich die Akzeptanz als eine Aneignung von etwas Angebotenem, etwas Vorhandenem oder etwas Vorgeschlagenem bezeichnen. In den verschiedenen Einsatzgebieten wird der Akzeptanzbegriff jedoch unterschiedlich verwendet, was eine klare Abgrenzung und Definition dieses Begriffs für diese Arbeit erfordert.

Aus diesem Grund ist das vorliegende Kapitel in fünf Teilbereiche gegliedert. In Abschnitt 4.1.1 soll zunächst der Ursprung der Akzeptanzforschung näher beleuchtet werden. Im Anschluss werden in Abschnitt 4.1.2 die Verbreitung des Akzeptanzbegriffs und der Stand der empirischen Forschung diskutiert. In den Abschnitten 4.1.3 und 4.1.4 wird das am weitesten verbreitete Modell der Akzeptanzforschung, das Technologieakzeptanzmodell (TAM) von Davis, vorgestellt. In Abschnitt 4.1.5 wird das TAM um weitere Attribute zur *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology* (UTAUT) bzw. zum TAM2-Modell erweitert. Das TAM2/UTAUT-Modell wird schließlich als Grundlage für diese Arbeit verwendet. In diesem Abschnitt wird auch die notwendige Adaption beschrieben und begründet.

### 4.1.1 Akzeptanz – Historische Entwicklung

In den 1970er Jahren wurde der Akzeptanzbegriff eingeführt, jedoch nicht, um die gesellschaftlichen Folgen einer neuen Technologie zu bewerten. Vielmehr wurde sich in der Akzeptanzforschung zu dieser Zeit mit ökonomischen Fragestellungen wie etwa der Abschätzung von Absatzmärkten, Absatzpotenzialen und wirtschaftlichen Risiken befasst, um unternehmerische Fehlinvestitionen zu vermeiden (Degenhardt, 1986). Ferner sollte bewertet werden, wie moderne Kommunikations- und Bürotechniken eingeführt und eingesetzt werden können, um den Ablauf in Unternehmen nachhaltig zu verändern.

Die Akzeptanzforschung widmete sich zunächst im Wesentlichen ökonomischen Fragestellungen.

---

<sup>1</sup> Akzeptanz ist immer auf ein Objekt bezogen, beispielsweise auf:

- Personen oder deren Verhaltensweisen,
- ihre Emotionen
- ihre Äußerungen

Erst infolge der zunehmenden und sich beschleunigenden Technisierung der Gesellschaft, die Anfang der 1980er Jahre auch private Haushalte erreichte, wurde sich im Rahmen der Akzeptanzforschung auch gesellschaftlichen Fragestellungen gewidmet (Glatzer & Hübinger, 1990). Eine wesentliche Grundannahme der aufkommenden sozialwissenschaftlich getragenen Akzeptanzforschung war eine zumindest ablehnende, wenn nicht sogar feindliche Einstellung der Bevölkerung gegenüber neuen Technologien. Diese Technologiefeindlichkeit wurde in der gesellschaftlichen Debatte dieser Zeit durch zum Teil unbewiesene Befunde befeuert. Beispielsweise wurden angeblich rückläufige Studierendenzahlen in naturwissenschaftlich-technologischen Studiengängen genauso aufgeführt wie die zunehmende Polarisierung der öffentlichen Meinung bezüglich der sich ausweitenden Kerntechnik zur Energiegewinnung. Dieses divergierende Meinungsbild, das sich in öffentlichen Kontroversen äußerte, wurde als grundsätzliche Ablehnung neuer Technologien durch die Bevölkerung fehlgedeutet. Petermann und Scherz (2005) sowie Jaufmann (1999) stellten dahingehend fest, dass zu dieser Zeit eine große Diskrepanz in der Einschätzung bestand, was unter ‚Akzeptanzschwierigkeiten‘ zu verstehen sei und wie diese gelöst werden könnten. Diese Diskrepanz äußerte sich auch in den Reden von Politikern, Vertretern der Wirtschaft und anderen, teils gesellschaftlichen Gruppierungen, die durch die vermeintlich zunehmende Technikfeindlichkeit eine Gefährdung der wirtschaftlichen Dynamik und Wettbewerbsfähigkeit sahen und damit negative Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt vorhersagten bzw. das exakte Gegenteil verlauten ließen.

Das stark divergierende Meinungsbild gegenüber bestimmten Technologien wurde als grundlegende Ablehnung neuer Technologien missgedeutet.

In dieser Gemengelage drängte die Politik darauf, die Determinanten der Technikakzeptanz zu bestimmen und daraus Erkenntnisse für theoretisches und praktisches Handeln abzuleiten. Grundsätzlich ist der Akzeptanzbegriff nicht ausschließlich mit ‚Technikakzeptanz‘ gleichzusetzen, wenngleich in einem sehr großen Anteil der wissenschaftlichen Veröffentlichungen eine Beschäftigung mit der Technikakzeptanz erfolgt. Insgesamt findet beinahe in jedem Forschungsgebiet eine fast vollständig isolierte Auseinandersetzung mit dem komplexen Konstrukt der Akzeptanz statt.

Eigentlich gilt Akzeptanz ≠ Technikakzeptanz

In den meisten Forschungsarbeiten erfolgt jedoch eine Auseinandersetzung mit Technikakzeptanz

#### **4.1.2 Akzeptanz – Begriffserklärung und Definition**

Da sich in zahlreichen Fachgebieten mit unterschiedlichen fachtypischen Herangehensweisen mit dem Konstrukt der Akzeptanz beschäftigt wird, entsteht eine Fülle verschiedener Begriffsverständnisse und -definitionen. In diesem Abschnitt soll daher versucht werden, die verschiedenen Begriffe zusammenzufassen und eine für diese Arbeit passende Definition der Akzeptanz herauszuarbeiten.

Begriffsursprung:  
Alltagssprache

Ursprünglich stammt der Begriff der Akzeptanz nicht aus einer wissenschaftlichen Betrachtung, sondern aus der Alltagssprache. Hier findet der Begriff häufig Anwendung, wenn es um wirtschaftliche, betriebliche oder gesellschaftliche Diskussionen, wie z. B. die ‚Akzeptanz der Energiewende‘, geht. Dabei wird die Einschätzung der Akzeptanz eines neuen Produktes, eines neuen Gesetzes oder einer gesellschaftlichen Aufgabe immer häufiger als Entscheidungsgrundlage oder als Verwendungskriterium verwendet.

Der Akzeptanzbegriff hat  
einen langen Entwicklungsweg  
hinter sich.

Noch in den 1980er Jahren gehörte der Akzeptanzbegriff *„nicht zum allgemein verbindlichen Bestand des deutschen Wortschatzes“* (Pressmar, 1982, S. 324). Pressmar stellte dahingehend fest, dass der Akzeptanzbegriff im Alltagsgebrauch häufig mit anderen Begriffen wie Toleranz, Billigung, Annahme und Duldung vermischt wird. Aus Degenhardt (1986) lässt sich für den wissenschaftlichen Gebrauch des Akzeptanzbegriffs eine ähnliche Folgerung ziehen, da er den Akzeptanzbegriff als *„Leerformel“* bezeichnet, der für die Beantwortung wissenschaftlicher Fragestellungen nicht geeignet ist. Dirkes (1982) versteht unter Akzeptanz beispielsweise *„eine zu einem bestimmten Zeitpunkt festzustellende und sich in bestimmten Meinungs- und Verhaltensformen äußernde Einstellung meist größerer gesellschaftlicher Gruppen gegenüber einzelnen Technologien“* (Dirkes, 1982, S. 12). Hilbig (1984) definiert den Akzeptanzbegriff ähnlich: *„eine mehr oder weniger zustimmende Einstellung eines Individuums oder einer Gruppe gegenüber einem Objekt, Subjekt oder sonstigem Sachverhalt“* (Hilbig, 1984, S. 120).

Akzeptanz ist ein  
zweidimensionales Phänomen,  
das aus einer  
Einstellungsakzeptanz und  
einer Verhaltensakzeptanz  
besteht.

Besonders der Terminus ‚Einstellung‘ stößt auf größere Kritik, weshalb in der aktuellen betriebswirtschaftlichen Akzeptanzforschung, die auf Müller-Böling und Müller (1986) zurückgeht und allgemein akzeptiert ist, auf diesen Begriff verzichtet wird. Stattdessen erweitern Müller-Böling und Müller den Akzeptanzbegriff um eine Aktivitätskomponente und fassen *„die Akzeptanz als zweidimensionales Phänomen [auf], das eine Einstellungs- und Verhaltenskomponente aufweist“* (Müller-Böling & Müller, 1986, S. 25). Sie bezeichnen nun die beiden Akzeptanzmerkmale als *„Einstellungsakzeptanz“* und *„Verhaltensakzeptanz“*.

Die Einstellungsakzeptanz  
besteht aus einer affektiven,  
kognitiven und konativen  
Komponente.

Dabei umfasst die Einstellungsakzeptanz eine kognitive, eine affektive und eine konative Komponente. In der affektiven, der Gefühlskomponente, werden relativ stabile motivational-emotionale Aspekte beschrieben, die durch ein Akzeptanzobjekt hervorgerufen werden. Beispielsweise lehnt eine Person neue Technologien emotional ab oder sieht sie als besonders interessant und reizvoll an (Bürg et al., 2004). Die kognitive Komponente beinhaltet eine Kosten-Nutzen-Abwägung einer Innovation unter Berücksichtigung persönlicher Vorstellungen, Ideen und Glaubensüberzeugungen (Bürg et al., 2004). Mit der konativen

Komponente wird die Verhaltensbereitschaft beschrieben, mit der eine Person eine Innovation verwenden möchte. Insgesamt besteht die Einstellungsakzeptanz aus internalen Aspekten, sodass sie nach Kollmann (2000) nicht direkt beobachtbar ist. Anstadt (1994) definiert Akzeptanz deshalb als den Ausdruck der positiven Einstellung eines Nutzers gegenüber einer neuen Technologie, der die Bereitschaft besitzt, diese Innovation in einer konkreten Situation zu nutzen. Die Nutzung der neuen Technologie kann dabei über mehrere Nutzungsniveaus (Akzeptanzstufen) erfolgen. Beispielsweise deutet eine rein passive Nutzung, wie die Betrachtung von Webseiten zu Recherchezwecken, auf ein relativ geringes Akzeptanzniveau hin. Andererseits kann von einem hohen Nutzungsniveau gesprochen werden, wenn ein Anwender die Innovation vielfältig, also über die erwartete Nutzung hinaus, einsetzt, indem er beispielsweise selbstständig Inhalte auf eine Online-Lernplattform stellt.

Kollmann (1998) fügt den Akzeptanzaspekten ‚Einstellung‘ und ‚Verhalten‘ noch die Handlungsakzeptanz hinzu. Denn *„Akzeptanz bildet die Verknüpfung einer inneren Begutachtung und Erwartungsbildung (Einstellungsebene), einer Übernahme der Nutzungsinnovation (Handlungsebene) und einer freiwilligen problemorientierten Nutzung (Nutzungsebene) bis zum Ende des gesamten Nutzungsprozesses“* (Kollmann, 1998, S. 129). Trotz allem weist Kollmann darauf hin, dass aus einem beobachtbaren Verhalten nicht immer valide Akzeptanzaussagen getroffen werden könnten. So könne aus dem Kauf einer Technologie keine Aussage über die Verhaltensakzeptanz gefolgert werden. Vielmehr sollte in der Akzeptanzforschung die Annahme einer neuen Technologie als Prozess verstanden werden, in dem aus der Nutzungshäufigkeit und der Nutzungsintensität Rückschlüsse auf ein Akzeptanzverhalten möglich werden (Kollmann, 1998).

Kollmann erweitert den Akzeptanzbegriff zu einem dreidimensionalen Phänomen, indem er den Aspekt der Handlungsakzeptanz ergänzt.

Die für diese Arbeit verwendete Akzeptanzdefinition spiegelt die Erkenntnisse der Akzeptanzforschung wider. Die Akzeptanz beinhaltet demzufolge eine relativ stabile kognitive und affektive Selbstwahrnehmungskomponente, gekoppelt mit einer positiven Einstellung gegenüber Multimediaanwendungen (Einstellungsebene), sowie eine Verhaltenskomponente, die eine tatsächliche Nutzung des Systems impliziert (Verhaltensebene). Durch die Messung des Akzeptanzverhaltens auf der Einstellungs- und Verhaltensebene können die Einflussfaktoren identifiziert werden, die eine positive Annahme der Innovationen bestärken bzw. im negativen Sinne zu einer Ablehnung führen. Im Rahmen dieser Studie wird sowohl die Einstellungs- als auch die Verhaltensebene, analog zu Venkatesh und Davis (2000), jeweils mit einem Item (AKV\_1 und AKV\_2) abgefragt.

Verwendete Akzeptanzdefinition

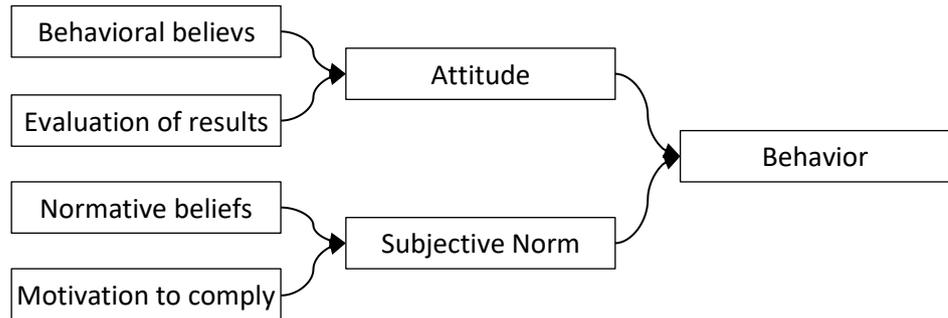


Abbildung 2: Theorie des geplanten Verhaltens (eigene Grafik nach Fishbein & Ajzen, 1975)

### 4.1.3 Akzeptanzmodelle zu Einstellungen und Verhalten

Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Komplexität des Akzeptanzbegriffs erfordert ein Modell, mit dessen Hilfe sich die Konstrukte der Akzeptanz von Einstellungen und der Akzeptanz von Verhalten erklären lassen. Dabei bildet in der sozialpsychologischen Forschung die Vorhersage eines Verhaltens aus den zugrunde liegenden Einstellungen ein Schwerpunktthema. Hierzu wurden in den vergangenen Jahrzehnten zahlreiche Modelle entwickelt, um die hierfür nötigen Beziehungen aufzuklären (vgl. Bierhoff, 2006).

#### 4.1.3.1 Theorie des überlegten Handelns

Als eine der heute bedeutendsten und allgemein akzeptierten Theorien in diesem Bereich gilt die *Theory of Reasoned Action* (TORA), übersetzt: die ‚Theorie des überlegten Handelns‘ von Fishbein und Ajzen (1975). Diese Theorie basiert auf der Annahme des Menschen als rationales Wesen, das Verhaltensentscheidungen auf der Grundlage einer systematischen Verarbeitung der ihm zugänglichen Informationen trifft. Konzipiert als hierarchisches Strukturmodell erfasst die TORA Überzeugungen (Beliefs), Einstellungen, die Subjektive Norm, die Verhaltensintentionen und das tatsächliche Verhalten in kausalen Beziehungen. In diesem Modell wird die Verhaltensintention als unmittelbarer Prädiktor für das Verhalten definiert (vgl. Rosch & Frey, 1997, S. 303). Fishbein und Ajzen definieren die Verhaltensintention als individuelle, subjektive Wahrscheinlichkeit, ein Verhalten in einer mehr oder weniger genau terminierten Zukunft auszuführen (aus dem engl. vgl. Fishbein und Ajzen (1975)). Als wesentliche Einflussfaktoren auf die Intention gelten z. B. die Einstellung gegenüber einer neuen Technologie sowie die Subjektive Norm.

Die Einstellungskomponente enthält Abwägungen, Erwartungen und Bewertungen

Die Einstellungskomponente umfasst dabei sowohl positive als auch negative Abwägungen bezüglich des geplanten Verhaltens. Außerdem enthält sie die Erwartungen einer Person, die in Verbindung mit dem Objekt stehen, das Verhalten und die damit einhergehenden bilanzartigen Bewertungen.

Die Einstellung wird in diesem Modell wiederum beeinflusst durch eine feste Beziehung zur Konsequenzerwartung, also ein Ziel, und einen gewichtenden Faktor, die Konsequenzbewertung, durch die diesem Ziel ein subjektiver, konkreter oder emotionaler Wert zugeordnet wird. Die Konsequenzerwartung wird laut Fishbein und Ajzen durch die Konsequenzbewertung von Werten und Motiven einer Person beeinflusst und als die Wahrscheinlichkeit beschrieben, mit der die Person annimmt, mittels eines Verhaltens ebendiese Ziele zu erreichen. Insgesamt verstehen Fishbein und Ajzen unter der Konsequenzerwartung ein Merkmal, das mit dem Einstellungsobjekt verbunden ist: „*In our conceptual framework, as a person forms beliefs about an object, he automatically and simultaneously acquires an attitude toward that object.*“ (Fishbein & Ajzen, 1975, S. 216) Daraus lässt sich schlussfolgern, dass Personen eine positive Einstellung zu einem Verhalten entwickeln, wenn absehbar ist, dass dieses mit hoher Wahrscheinlichkeit zu positiven oder mit geringer Wahrscheinlichkeit zu negativen Konsequenzen führt.

Eine positive Einstellung resultiert aus einer Einschätzung, dass ein positives Verhalten zu einer positiven Konsequenz führt.

Neben der Einstellung zu einem Objekt wird der soziale Kontext einer Person durch die subjektive Norm erfasst (Fishbein & Ajzen, 1975, 301ff). Diese umfasst die subjektiv empfundene Erwartung, wie individuell relevante Bezugspersonen hinsichtlich des geplanten Verhaltens reagieren würden. Fishbein und Ajzen (1975, S. 302) verstehen darunter „*the person’s perception that most people who are important to him think he should or should not perform the behavior in question*“.

Außerdem enthält diese Komponente soziale Bedingungen, unter denen eine Person ein Verhalten mit höherer Wahrscheinlichkeit ausführt. Dies gilt insbesondere dann, wenn die aus dem Verhalten resultierende Konsequenz positiv bewertet wird. Verstärkt wird dies durch die subjektive Annahme, dass eine dritte Person das auszuführende/ausgeführte Verhalten ebenfalls positiv bewerten würde. Fehlen relevante Personen im Umfeld, wird die subjektive Norm im Vergleich zur Einstellung an Bedeutung verlieren. Genauso gilt allerdings auch die Umkehrung: Befindet sich eine Person in einer starken persönlichen und emotionalen Abhängigkeit, wird die subjektive Norm einen höheren Stellenwert einnehmen als die generelle Einstellung zu einem Objekt. Es ist jedoch auch anzumerken, dass es sich bei diesem Konstrukt um etwas subjektiv Empfundenes handelt, dass also die tatsächliche Erwartung der dritten Person nicht in dieses Modell eingeht.

Die subjektive Norm legt Bedingungen fest, die zu einer Ausführung/Anwendung führen können.

Die Verhaltensprädiktion benötigt zusätzliche Variablen, um eine ausreichend genaue Vorhersage treffen zu können.

Neben den von Fishbein und Ajzen beschriebenen Verhaltensprädiktoren gibt es hierfür verschiedene weitere Vorschläge (exemplarisch: Fischer & Wiswede, 2009, S. 325; Haddock & Maio, 2007, S. 221f). Beispielsweise schlagen Bentler und Speckart (1979) vor, auch vergangene Handlungen in die Verhaltensprädiktion einzubeziehen, um so eine bessere Erklärung für eine bestimmte Handlungsweise zu erhalten. Mummendey (1988, S. 12) stellt fest, dass sich solche Drittvariablenansätze nahezu beliebig fortsetzen lassen. Er unterstreicht dabei, dass sich mit jeder zusätzlichen Variable die Verhaltensprädiktion dem tatsächlichen Handeln sukzessive annähert. Insgesamt kann gefolgert werden, dass sich Verhalten „nicht ausschließlich auf Grundlage der Abfrage von Einstellungen begründen bzw. prognostizieren lässt. Es bedarf zusätzlicher Prädiktoren“ (Pröbstle, 2014, S. 106).

### 4.1.3.2 Theorie des geplanten Handelns

**internale Faktoren:**  
Informationen, Fähigkeiten,  
Selbstdisziplin, Willensstärke,  
Zwänge und Gewohnheiten

**externale Faktoren:**  
Zeitdruck, Gelegenheit,  
unerwartete Ereignisse und  
das Verhalten anderer

Eine Erweiterung der TORA um die Dimension der wahrgenommenen Verhaltenskontrolle ist die *Theory of Planned Behavior* (TOPB) – die übersetzt: ‚Theorie des geplanten Verhaltens‘ – von Icek Ajzen (1985). Ajzen sah die Notwendigkeit für diese Erweiterung der TORA, da diese auf Verhalten beschränkt ist, das vollständig unter willentlicher Kontrolle steht. Um allerdings Verhalten in Bereichen eingeschränkter Kontrolle vorhersagen zu können, wird in der TOPB die Komponente ‚wahrgenommene Verhaltenskontrolle‘ berücksichtigt. Mit dieser wird eine Aussage darüber getroffen, inwieweit eine Person die Verhaltensaussführung willentlich kontrollieren kann. Diese dritte Komponente beschreibt also, wie sich die Verhaltensabsicht auf das Verhalten auswirkt. Ajzen behauptet hier, dass die wahrgenommene Verhaltenskontrolle direkt auf das Verhalten wirke. Er beschreibt, dass diese Komponente willentlich nicht kontrollierbare, internale sowie externale Einflussfaktoren umfasse, die die Überzeugung einer Person widerspiegeln, wie leicht oder schwierig das beabsichtigte Verhalten tatsächlich für sie selbst durchzuführen ist.

In verschiedenen empirischen Studien wurde herausgefunden, dass für die Vorhersage von Verhaltensabsichten und Verhalten etwaige erwartete Schwierigkeiten bei der Ausführung einer Handlung auf die Verhaltensaussübung einen größeren Einfluss besitzen als die wahrgenommene willentliche Beherrschbarkeit einer Handlung (I. Ajzen, 2001, S. 44). Demnach steht eine grundsätzlich optimistische Einschätzung der eigenen Verhaltenskontrolle in einem engen Zusammenhang mit der Menge an zur Verfügung stehenden kognitiven Ressourcen, Fertigkeiten und Verhaltensmöglichkeiten, die diese Person zu besitzen glaubt (Frey et al., 1993, S. 381–383; Nieschlag et al., 2002, S. 598). Insgesamt beeinflussen sich die Subjektive Norm, die persönliche Einstellung gegenüber einer Handlung sowie die wahrgenommene persönliche

Verhaltenskontrolle gegenseitig und wirken somit in der TOPB über die Handlungsabsicht indirekt auf das konkrete Verhalten. Dies unterscheidet die TOPB von der TORA, in der als Grundannahme eine Unabhängigkeit aller Intensionsdeterminanten vorgesehen ist.

Dadurch ändert sich gleichzeitig die Qualität der Prädiktion der Verhaltensintention. In diesem Zusammenhang sei jedoch darauf hingewiesen, dass durch die TOPB nur die Verhaltensabsicht vorhergesagt wird, nicht aber zwangsläufig die tatsächliche Verhaltensausführung. Denn für den Fall, dass kein Verhalten zustande kommt, hat sich entweder die Verhaltensintention verändert oder die Person verfügt nicht über die notwendige Verhaltenskontrolle.

#### 4.1.4 Das Technologieakzeptanzmodell von Davis

Eine weitere Erweiterung der TORA ist das Technologieakzeptanzmodell (TAM), das von Davis (1986) im Rahmen seiner Dissertationsarbeit entwickelt wurde. Die Zielsetzung des TAM bestand darin, die Akzeptanz technischer Systeme vorherzusagen. F. D. Davis verwendet in seinem Modell, in Anlehnung an die Theorien von Fishbein und Ajzen zur Vorhersage des (Akzeptanz-)Verhaltens, die Verhaltensintention (engl. *Behavioral Intention*; BI) als unmittelbaren Prädiktor. Er beschreibt, dass die Intention (*Attitude Toward Using*; ATU) die Absicht einer Person ausdrückt, ein relevantes und mögliches technisches System zukünftig einzusetzen. Ferner geht er davon aus, dass die Intention von zwei subjektiv wahrgenommenen und vom betrachteten System abhängigen Komponenten, dem wahrgenommenen Nutzen (*Perceived Usefulness*; PU) und der wahrgenommenen Bedienbarkeit (*Perceived Ease of Use*; PEOU), beeinflusst wird (F. D. Davis, 1989, S. 320).

Das TAM ist die Erweiterung der TORA

Diese Komponenten werden im Modell von weiteren Variablen beeinflusst, die Davis zunächst als „*Design Features*“ (F. D. Davis, 1986, S. 24) bezeichnet und in seinen weiteren Ausarbeitungen schließlich zu „*External Variables*“ erweitert (F. D. Davis, 1989; F. D. Davis et al., 1989, S. 985). In auf dem TAM basierenden Studien werden Design Features unterschiedlich interpretiert. So fallen beispielsweise nach Venkatesh und Davis (2000) die ‚wahrgenommene Job-

Design Features sind eine Untermenge von External Variables

Sie beeinflussen den wahrgenommenen Nutzen.

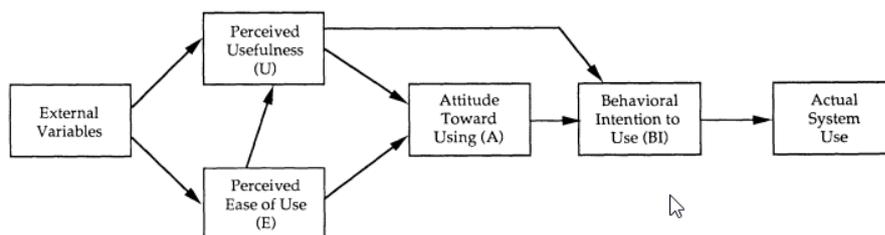


Abbildung 3: Technology Acceptance Model (TAM) (Davis, Bagozzi & Warshaw, 1989, S. 985).

Relevanz', die ‚Subjektive Norm‘, die ‚Outputqualität‘ oder auch die ‚Nachweisbarkeit der Ergebnisse‘ in diese Mischgröße. Insgesamt gilt dieses Modell in der Akzeptanzforschung als das am besten empirisch evaluierte und operationalisierte, prädiktive Modell zur Erklärung der Akzeptanz technischer Systeme, wenn es darum geht, Zusammenhänge zwischen Einstellungen und Verhalten zu beschreiben (King & He, 2006a; Legris et al., 2003; Schepers & Wetzels, 2007; Venkatesh & Bala, 2008), und wurde bis August 2018 etwa 38.000-mal zitiert. Zum Großteil stammen die Referenzen aus den USA, Kanada oder England (vgl. Peek et al., 2014, S. 239) Die offensichtliche Popularität des TAM kann durch mehrere Punkte begründet werden:

Wahrgenommener Nutzen und wahrgenommene Bedienbarkeit klären etwa 40% der Einsatzintention einer Person auf

Beim TAM handelt es sich um ein rationales Modell, mit dem beschrieben wird, wie internale Überzeugungen und Einstellungen auf die Akzeptanz technischer Systeme wirken. Dadurch lassen sich konkrete Empfehlungen für den Betrieb oder die Entwicklung neuer Systeme ableiten. Ferner konnte in systematischen empirischen Untersuchungen gezeigt werden, dass die im Modell verwendeten Variablen ‚wahrgenommener Nutzen‘ und ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ typischerweise etwa 40 Prozent der Intention einer Person aufklären. Außerdem beschreiben sie, ob eine Technologie in verschiedenen Kontexten eingesetzt (Holden & Karsh, 2010; King & He, 2006a; Legris et al., 2003; Schepers & Wetzels, 2007), ein zukünftiger Einsatz geplant (M. Turner et al., 2010) oder auch abgelehnt wird (J. Wu & Du Hongwei, 2012).

TAM wurde anfänglich fast ausschließlich verwendet, um wirtschaftliche Aspekte zu untersuchen

Bei der Betrachtung des TAM ist auch zu berücksichtigen, dass dieses bis weit in die 1990er Jahre fast ausschließlich zur Analyse der Akzeptanz von Systemen bei Mitarbeitern in Unternehmen eingesetzt wurde. In der aktuellen Akzeptanzforschung wird sich mit Hilfe des TAM vermehrt der Nutzung neuer Informations- und Kommunikationssysteme zugewandt. Damit findet das TAM heute auch bei der Analyse der Akzeptanz von beispielsweise Kryptowährungen (Kumpajaya & Dhewanto, 2015) oder von mobilen oder virtuellen Zahlungssystemen (Schierz, 2008), zur Untersuchung des Kaufverhaltens im Internet (Kulviwat et al., 2007; Lin & Wang, 2005; Thong et al., 2011), bei der Nutzung privater Computer oder Tablets (El-Gayar et al., 2011; Venkatesh & Brown, 2001) oder bei der Akzeptanz von Online-Spielen (Hsu & Lu, 2004) Anwendung.

Die von Davis erarbeitete Beschreibung der Akzeptanz und des Akzeptanzverhaltens stimmt mit der oben gewählten Akzeptanzdefinition weitgehend überein, sodass sich für die vorliegende Arbeit die Akzeptanz sowohl mit der Einstellung zu einer neuen Technologie als auch durch ein beobachtbares Verhalten beschreiben lässt. Im nachfolgenden Abschnitt sollen daher die

einzelnen Modellkomponenten erläutert sowie mögliche Implikationen für deren empirische Überprüfung herausgearbeitet werden.

#### 4.1.4.1 Akzeptanzverhalten

Der Aktivitätsaspekt bzw. der Einsatz eines Akzeptanzobjekts lässt sich nach Davis im Modell durch die mehrmalige Nutzung einer Technologie als beobachtbares Verhalten beschreiben: „*Use refers to an individual's actual direct usage of the given system in the context of his or her job. Thus, use is a repeated, multiple-act behavioral criterion that is specific with respect to target (specified system), action (actual direct usage) and context (in person's job), and non-specific with respect to time frame. Attitude refers to the degree of evaluative affect that an individual associates with using the target system in his or her job.*“ (F. D. Davis, 1986, S. 25)

Davis (F. D. Davis, 1986, 1989; F. D. Davis et al., 1989) entwickelte das TAM so, dass mittels einer Längsschnittanalyse das Akzeptanzverhalten vorhergesagt werden kann. Dabei sollen beim ersten Messzeitpunkt die Attribute ‚wahrgenommener Nutzen‘, ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ sowie ‚Verhaltensintention‘ erfasst werden. Beim zweiten Messzeitpunkt erfolgt dann die Analyse des tatsächlichen Verhaltens.

TAM wurde als Längsschnittmodell mit mehreren Testzeitpunkten entwickelt

Jedoch zeigten bereits Legris et al. (2003) in einem systematischen Review, dass in der Mehrzahl der betrachteten empirischen Studien die Selbstwahrnehmung in Bezug auf die Nutzungshäufigkeit und die Nutzungsintensität als Grundlage der Untersuchung verwendet wird. Den Autoren zufolge wurde lediglich in einer Studie ein objektives Messverfahren für die Nutzungshäufigkeit und -intensität verwendet, indem das Nutzungsverfahren mittels Logfile-Analyse erfasst wurde (Henderson & Divett, 2003). Nach Legris et al. (2003) sind die Gründe für dieses Vorgehen in den meisten Forschungsarbeiten nicht dokumentiert. In einigen wenigen Fällen verweisen die Autoren darauf, dass sich das von ihnen entwickelte System noch in einem frühen Stadium befinde und dass die Ergebnisse der Erhebung ebendiese verbessern sollen, weshalb auf die Selbstwahrnehmung zurückgegriffen worden sei (vgl. Schierz, 2008).

Meist wird das TAM nur mit dem subjektiven Empfinden einer Person angewendet

Diese Arbeit orientiert sich an der langjährigen Praxis. Es wird eine Selbsteinschätzung als Basis für das beabsichtigte Verhalten verwendet, da die Fortbildungsveranstaltung explizit auf das Autorensystem PUMA ausgerichtet war (s. Unterkapitel 5.3). Nach Ansicht des Autors der vorliegenden Studie reicht ein Autorensystem jedoch meist nicht aus, um alle Funktionen, die von Lehrkräften gewünscht werden, abzudecken, da hierdurch die Nutzerfreundlichkeit negativ beeinträchtigt würde. Dieser Umstand wurde auch im Workshop, der in Abschnitt 5.2.1 näher beschrieben wird, besonders betont. Zudem können in der vorliegenden Studie lediglich die Daten von PUMA ausgewertet werden, sodass

alle Teilnehmer, die nicht PUMA, sondern ein anderes Autorensystem im Unterricht oder in der Unterrichtsvorbereitung verwendet haben, im Modell als negativ aufgefasst werden und die Validität des Modells negativ beeinflussen, obwohl sie tatsächlich als positiv gewertet werden müssten. Damit würde eine erhebliche Verzerrung der Ergebnisse eintreten.

### 4.1.4.2 Intention

Die Einsatzintention (Intention) einer neuen Technologie wird im TAM, in Anlehnung an die Modelle von Fishbein und Ajzen, dem Akzeptanzverhalten als Prädiktorvariable vorangestellt. Dieser Zusammenhang wurde in einer Reihe von Studien bestätigt (Legris et al., 2003; Olbrecht, 2010). Die Intention wiederum wird von den Attributen ‚wahrgenommener Nutzen‘ und ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ beeinflusst. F. D. Davis (1989) nimmt diese beiden Variablen als unabhängige Variablen an, die durch die Intention moderiert werden. Die Annahme, dass die Intention eine Moderatorvariable darstellt, kann mit Holmbeck (1997) sowie Baron und Kenny (1986) begründet werden, sofern vier Bedingungen erfüllt sind:

- (1) Die unabhängige Variable hat einen signifikanten Effekt auf die potenzielle Mediatorvariable.
- (2) Es besteht eine signifikante Korrelation zwischen der Mediatorvariablen und der unabhängigen Variablen.
- (3) Die Mediatorvariable beeinflusst ihrerseits signifikant die abhängige Variable.
- (4) Die Effektstärke der unabhängigen Variablen auf die potenzielle Mediatorvariable muss sich verringern, wenn in der Berechnung der Regression gleichzeitig die Mediatorvariable als zusätzlicher Prädiktor aufgenommen wird.

Allerdings belegten Horton et al. (2001), dass neben der Verhaltensintention auch die unabhängigen Variablen einen direkten Einfluss auf das Akzeptanzverhalten ausüben. Zum selben Schluss kommt auch Olbrecht (2010), der der Intention einen weitaus geringeren Einfluss auf das Akzeptanzverhalten zuspricht, als von Davis vorhergesagt wurde. Olbrecht zeigt dabei auf, dass in Übereinstimmung mit Horton et al. (2001) die Attribute ‚wahrgenommener Nutzen‘ und ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ stärker direkt auf das Akzeptanzverhalten wirken als auf die Intention selbst.

Wegen der unklaren Befundlage der Wirkungszusammenhänge zwischen der Variablen ‚Intention‘ und den Attributen ‚wahrgenommener Nutzen‘ und ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ wird in dem Modell, das dieser Arbeit zu Grunde liegt, neben der jeweiligen Wirkung auf die Intention auch die direkte Wirkung auf das Akzeptanzverhalten angenommen und in die Berechnung eingeschlossen, auch wenn dies der Grundannahme von F. D. Davis (1989) widerspricht.

**Annahme:** Wahrgenommener Nutzen und wahrgenommene Bedienbarkeit wirken sowohl auf die Variable *Intention* als auch auf das Akzeptanzverhalten.

#### 4.1.4.3 Wahrgenommener Nutzen

Mit dem Attribut ‚wahrgenommener Nutzen‘ drückt F. D. Davis (1989, S. 320) die subjektive und individuelle Überzeugung aus, dass der Technologieeinsatz zur Verbesserung der eigenen Arbeitsleistung beitragen kann: *„the degree to which an individual believes that using a particular system would enhance his or her job performance.“* F. D. Davis (1986) begründet dieses Attribut mit Arbeiten von Shultz und Slevin (1975) sowie Robey (1979). Shultz und Slevin sowie Robey untersuchten in ihren jeweiligen Studien den Einfluss von computergestützten Informations- und Managementsystemen in Unternehmen auf die Produktivität der Angestellten. Robey stellte darin fest: *„A system that does not help people perform their job is not likely to be received favorably in spite of careful implementation efforts.“* (Robey, 1979, S. 537) Nach Robey sind Personen bestrebt, ihre persönliche berufliche Leistung zu steigern, da sich daran meist eine materielle Vergütung in Form von beispielsweise Boni, Gehaltserhöhungen oder anderen, subjektiv erstrebenswerten Vergütungen misst. In zahlreichen Studien zum Technologieakzeptanzmodell wurde der wahrgenommene Nutzen sogar als der stärkste Prädiktor der Intention ermittelt (King & He, 2006b). In bisherigen Studien wurde stets der Nutzen untersucht, den der Verwender selbst aus dem Einsatz einer (neuen) Technologie ziehen kann. Im Kontext Schule sollte neben dem persönlichen Nutzen einer Lehrkraft auch der Nutzen für Schülerinnen und Schüler untersucht werden, den Lehrkräfte subjektiv auf den Einsatz der (neuen) Technologie zurückführen. Denn für eine Lehrkraft sollte es zunächst idealerweise unerheblich sein, ob sie persönlich einen Vorteil aus einem Technologieeinsatz ziehen kann, da ihr Hauptaugenmerk darauf liegt, wie sie einen fachlichen Inhalt möglichst gut an Schülerinnen und Schüler vermitteln kann. Deshalb wird im Rahmen der vorliegenden Studie ebenfalls dieser Einfluss auf die Akzeptanz untersucht.

**Schulkontext:** Neben dem wahrgenommenen persönlichen Nutzen sollte auch der Nutzen für Schülerinnen und Schüler untersucht werden.

#### 4.1.4.4 Wahrgenommene Bedienbarkeit

Das Attribut ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ ist mit der Benutzerfreundlichkeit eines technischen Systems gleichzusetzen. F. D. Davis et al. (1989) beschreiben mit diesem Attribut die zu erwartende geistige und körperliche Anstrengung, die der Nutzer zur Bedienung des untersuchten Systems aufbringen muss. Davis et al.

gehen dabei davon aus, dass ein subjektiv schwieriger zu bedienendes System eher abgelehnt wird als ein einfacher zu bedienendes System. Sie schreiben: „*All else being equal, we claim, an application perceived to be easier to use than another is more likely to be accepted by users.*“ (F. D. Davis et al., 1989, S. 320) Davis und seine Co-Autoren betonen dabei, dass es sich beim Attribut ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘, analog zum ‚wahrgenommenen Nutzen‘, um eine subjektive Einschätzung handelt und diese von der objektiven Einschätzung der gleichen Attribute abweichen könne. Es sei daher auch nicht möglich, z. B. den objektiven Systemnutzen oder die objektive Handhabbarkeit eines Systems zu ermitteln. Dies bestätigen auch Alavi und Henderson (1981), die herausfanden, dass die Befragten den Nutzen eines technischen Systems als eher gering einschätzten, obwohl durch den Einsatz des untersuchten Systems die Produktivität erhöht wurde.

Im Modell hat das Attribut der ‚wahrgenommenen Bedienbarkeit‘ einen direkten Einfluss sowohl auf die Intention als auch auf den wahrgenommenen Nutzen einer Technologie. Mit dem Modell wird also die Kausalität beschrieben, dass ein System, das als einfach zu bedienen gilt und zu einer Leistungssteigerung führt, den wahrgenommenen Nutzen erhöht (1986; F. D. Davis).

#### **4.1.4.5 Externe Variablen – Design Features**

In der ursprünglichen Ausgestaltung des TAM nach F. D. Davis (1986; F. D. Davis), F. D. Davis (1989) und F. D. Davis et al. (1989) wurden die Attribute ‚wahrgenommener Nutzen‘ und ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ durch externe Faktoren beeinflusst. Sie können Systemmerkmale wie beispielsweise Eingabegeräte (Tastatur, Maus, Stifte, Finger), Merkmale der Benutzeroberfläche, wie beispielsweise die Position der Navigationsleisten, ikonisch dargestellte Schaltknöpfe oder auch (interaktive) Hilfe- und Supportmöglichkeiten umfassen. Eine konkrete Operationalisierung und empirische Überprüfung wurden von Davis et al. allerdings nicht vorgenommen. Sie sahen hier vielmehr die Basis für zukünftige Forschung:

*„[...] we explicitly include external variables in our description of the model to underscore the fact that one of its purposes is to provide a foundation for studying the impact of external variables on user behavior.“* (F. D. Davis et al., 1989, S. 989)

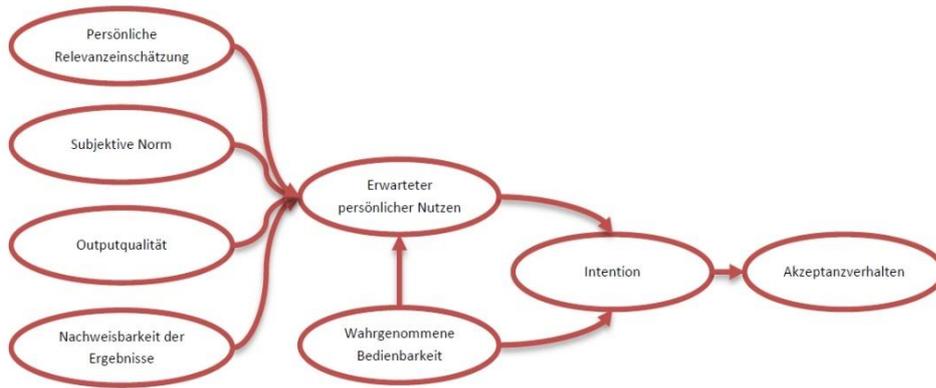


Abbildung 4: Variante des UTAUT(TAM2)-Modells (eigene Darstellung nach (Venkatesh et al., 2003, 435ff)):

Für das UTAUT-Modell wurde das ursprüngliche TAM bereits um zahlreiche Einflussfaktoren ergänzt. In der Abbildung ist eine Auswahl von Einflussfaktoren dargestellt, die im Kontext Schule relevant sein können.

#### 4.1.5 Modellerweiterung – vom TAM zur UTAUT

Bei der Vorstellung des TAM verzichtete F. D. Davis (1986) darauf, den Modellfaktor ‚subjektive Norm‘ von den Modellen von Fishbein und Ajzen zu übernehmen: „*In a user acceptance test, subjects will typically be seeing the target system (generally new system prototype) for the first time, and will therefore not have been able to receive cues from referents upon which to draw normative inferences.*“ (F. D. Davis, 1986, S. 37) Von diesem Standpunkt rückten F. D. Davis et al. (1989) ab, denn beim Vergleich des Akzeptanzmodells mit der Theorie des überlegten Handelns von Ajzen konnten die Autoren zwar keinen Einfluss der Subjektiven Norm auf das Verhalten ermitteln, jedoch ergaben sich Hinweise darauf, dass der Einfluss des sozialen Umfelds vom Untersuchungsgegenstand abhängt. Sie schlossen daraus, dass bei Einzelanwendungen, wie Tabellenkalkulations- oder Textverarbeitungsprogrammen, kein Zusammenhang zwischen der subjektiven Norm und der Nutzung des untersuchten Systems nachzuweisen ist. Dagegen erwarten F. D. Davis et al. (1989) einen signifikanten Beitrag der subjektiven Norm zur Erklärung der Verhaltensakzeptanz bei kollaborativen Systemen, sofern diese in ein Netz sozialer Interaktionen integriert sind. Dazu zählen Systeme, die z. B. einen Austausch von Informationen beinhalten, wie E-Learning-Anwendungen, cloudbasierte Kollaborationssysteme genauso wie E-Mail-Anwendungen und ‚althergebrachte‘ Telekommunikationssysteme. Davis selbst war es, der diesbezüglich eine weitergehende Forschung anregte: „*Further research is needed to address the generalizability of our SN [Anmerkung des Autors: subjective norm] findings, to better understand the nature of social influences, and to investigate conditions and mechanisms governing the impact of social influences on usage behavior.*“ (F. D. Davis et al., 1989, S. 999)

Subjektive Norm muss beachtet werden, wenn das Untersuchungsobjekt in ein Netz aus sozialen Interaktionen (z.B. Kollaborationssoftware) integriert ist.

UTAUT = Erweiterung des TAM  
um die soziale Norm und  
unterstützende  
Rahmenbedingungen  
(persönliche  
Relevanzschätzung,  
Outputqualität,  
Nachweisbarkeit der  
Ergebnisse,...)

Venkatesh et al. (2003) erweiterten schließlich das TAM zur *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology* (UTAUT), indem dem TAM die Domänen der ‚sozialen Norm‘ und der ‚unterstützenden Rahmenbedingungen‘ (*Facilitating Conditions*) hinzugefügt wurden, die zuvor bereits in der Theorie des geplanten Handelns enthalten waren. Damit stieg die Varianzaufklärung der Einsatzabsicht von 40 auf bis zu 70 %. Allerdings muss hier in Kauf genommen werden, dass das Erhebungswerkzeug wesentlich umfangreicher wird, da noch vier moderierende Faktoren (Geschlecht, Alter, Erfahrung und Freiwilligkeit der Nutzung) abgefragt werden müssen (Venkatesh et al., 2003).

Die Erweiterung des TAM mit Teilen der TORA konnten auch Hansen et al. (2018) in ihrer Studie über die Vorhersage von Social Networks bestätigen, indem sie die Attribute ‚wahrgenommenes Risiko‘ und ‚wahrgenommenes Vertrauen‘ hinzufügten: „[...] *there are benefits to integrating concepts from the two models instead of choosing one model over the other in research and practice.*“ (Hansen et al., 2018, S. 197)

Inzwischen gilt das UTAUT-Modell, das häufig auch als TAM2-Modell bezeichnet wird, als allgemein anerkannt und wurde bereits häufig empirisch untersucht (King & He, 2006a; Legris et al., 2003; Schepers & Wetzels, 2007). Eines der ausschlaggebenden Argumente für dieses Modell ist dessen enorme Flexibilität. So wurde sowohl das TAM als auch das UTAUT-Modell bereits um zahlreiche weitere potenzielle Einflüsse erweitert und getestet (vgl. Wingo et al., 2017).

Auch das in dieser Arbeit verwendete Modell ist eine Adaption des TAM auf Basis des UTAUT-Modells. Es werden weitere Attribute ergänzt, die im Zusammenhang mit der Akzeptanzuntersuchung von Multimediaanwendungen im Physikunterricht in Betracht gezogen werden sollten. Dabei handelt es sich um das Attribut des Nutzens, den Lehrkräfte für ihre Schüler sehen, wenn sie Multimediaanwendungen im Physikunterricht einsetzen. Im Folgenden wird dieses Attribut als ‚wahrgenommener Nutzen für SchülerInnen‘ bezeichnet.

TAM2/UTAUT deckt nicht das  
Wissen über eine Technologie  
und deren Wirkungen im  
Unterricht ab.

Im Rahmen von klassischen und in der Regel eintägigen Fortbildungsveranstaltungen für Lehrkräfte werden meist zahlreiche innovative Lehr- und Lernansätze genauso vermittelt wie Wissen über Lehr- und Lernprozesse. Dazu gehört auch das Wissen über neue und innovative Technologien für den Unterrichtseinsatz. Dieses (zusätzliche) Wissen über neue Technologien wird im Technologieakzeptanzmodell jedoch nicht abgebildet. Daher soll im Rahmen dieser Studie untersucht werden, welchen Einfluss das Wissen, das eine Lehrkraft über eine Technologie und über deren pädagogisch begründete Einsatzmöglichkeiten im Unterricht besitzt, auf die Akzeptanz dieser Technologie ausübt.

#### 4.1.6 Grenzen des TAM und des UTAUT-Modells

Das TAM und das UTAUT-Modell sind, wie bereits erwähnt, bekannte und weit verbreitete sowie robuste Modelle. Dennoch gibt es auch Kritikpunkte, die im Folgenden diskutiert werden sollen, um eine ausgewogene Betrachtung des Sachverhaltes zu gewährleisten.

Beispielsweise übersahen Davis et al. (F. D. Davis, 1986, 1989; F. D. Davis et al., 1989), dass die Technologieakzeptanz im Laufe der Zeit variieren kann (Liao et al., 2009; Venkatesh et al., 2007; Yousafzai et al., 2007; Zheng et al., 2007). Darüber hinaus ist durch mehrere Studien belegt, dass sich der Einfluss des ‚wahrgenommenen Nutzens‘, der ‚wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit‘ und anderer relevanter Faktoren zwischen der Implementierungsphase (wenn eine Technologie noch nicht verwendet wurde) und der Nutzungsphase (wenn Benutzer eine Technologie verwendet und erlebt haben) unterscheidet (Bhattacharjee & Premkumar, 2004; Karahanna et al., 1999).

Ferner wird die Akzeptanzforschung grundsätzlich dafür kritisiert, zu sehr auf das TAM und seine Erweiterung, das UTAUT, angewiesen zu sein, sodass dadurch wesentliche Determinanten unbeachtet bleiben (Bagozzi, 2007; Bouwhuis et al., 2012; Yousafzai et al., 2007). In einem Review von 19 Studien diskutieren Chen und Chan (2011) das TAM, das UTAUT und andere relevante Modelle und Konstrukte, um die Technologieakzeptanz bei Erwachsenen zu erklären. Chen und Chan fanden heraus, dass spezifische biophysikalische und psychosoziale Faktoren wie ein kognitiver und physischer Verfall bzw. die soziale Isolation oder die Angst vor einer Krankheit im Zusammenhang mit dem Altern als Einflussfaktor auf die Technologieakzeptanz in der aktuellen Literatur übersehen werden. Sie bemerkten auch, dass die Kosten für eine Technologie in vielen Studien vernachlässigt werden, obwohl dies eine kritische Variable für die Akzeptanz einer neuen Technologie vor allem auch bei älteren Erwachsenen zu sein scheint (Chen & Chan, 2011). Ferner stellten Chen und Chan (2011) fest, dass sich ein Großteil der Akzeptanzforschung mit Kommunikationsmitteln und unterstützenden Technologien wie z. B. Multimediaanwendungen beschäftigt, wobei andere Technologiearten häufig vernachlässigt werden. Diese Bedenken deuten darauf hin, dass mehr Forschung erforderlich ist, um ein besseres Verständnis der Akzeptanz verschiedener Technologiearten bei Erwachsenen zu entwickeln.

Ein weiterer Kritikpunkt am TAM und der UTAUT ist die starke Situationsabhängigkeit der Modelle. Die stärksten Zusammenhänge zwischen Variablen zeigen sich immer bei den Variablen, die zum gleichen Zeitpunkt gemessen werden (Gibbons et al., 1998; Reinecke et al., 1997). Belegt wird dies auch durch Studien, in denen die Stabilität der Modellvariablen untersucht

Das TAM ist stark  
situationsabhängig; stärkste  
Zusammenhänge bei gleichzeitig  
gemessenen Variablen

wurde. Dabei wurde festgestellt, dass in den meisten dieser Studien die Stabilität der Modellvariablen gering war (vgl. Plies & Schmidt, 1996; Reinecke et al., 1997).

Persönliche Befürchtungen vor der Implementierung können derart stabil sein, dass sie auf die Zeit nach der Einführung ausstrahlen.

Peek et al. (2014) beschreiben in ihrem systematischen Review weitere Problemstellen. So können auch soziale und persönliche Befürchtungen aus der Phase vor der Implementierung einer neuen Technologie, wie z. B. das Vergessen, wie eine Technologie bedient wird, oder auch der spätere Verlust der Technologie, in der Phase nach der Implementierung zu einem Problem werden. Nach Peek lässt sich anhand quantitativer Ergebnisse ebenfalls erkennen, dass eine kleine Anzahl von Variablen, wie beispielsweise der subjektive Gesundheitszustand einer Person, einen signifikanten Einfluss in der Phase vor der Implementierung auf die Akzeptanz dieser Technologie haben kann.

## 4.2 Das TPACK

Mit der zunehmenden Technisierung der Gesellschaft rückt auch der Technologieeinsatz beim Lehren und Lernen im Physikunterricht immer häufiger ins Zentrum wissenschaftlicher Arbeiten. So wurde der Einsatz moderner Technologien in den vergangenen Jahrzehnten bereits in diversen Forschungsprojekten weltweit untersucht (vgl. DiMauro, 2005; C. R. Graham, 2011). Wegen der mannigfaltigen Einsatzmöglichkeiten von Technologien im Physikunterricht gibt es ebenso viele Forschungsrichtungen. In den vergangenen Jahren waren beispielsweise die Untersuchung virtueller Labore (Potkonjak et al., 2016; Thoms & Girwidz, 2017) oder die Untersuchung der Professionsentwicklung bei naturwissenschaftlichen Lehrkräften (Borko; Jimoyiannis, 2010) Forschungsschwerpunkte. Ferner untersuchte Niess (2005) die Entwicklung des technologischen pädagogischen Inhaltswissens (TPACK) angehender naturwissenschaftlich-mathematischer Lehrkräfte in einem fachspezifischen, technologieintegrierten Ausbildungsprogramm. Das Technological, Pedagogical, and Content Knowledge (TPACK) beschreibt dabei ein Modell, das aus den verschiedenen Wissensbereichen besteht, das die Kompetenzen darstellt, die Lehrkräfte in der Ausbildung im 21. Jahrhundert entwickeln sollen, um z. B. digitale Technologien erfolgreich in Lehr- und Lernprozesse integrieren zu können (M. J. Koehler et al., 2014; Kopcha et al., 2014). Das TPACK von Mishra und Koehler (2006) ist seither zu einem anerkannten konzeptionellen Rahmen gereift.

In dieser Studie soll der Einfluss, den das TPACK einer Lehrkraft auf das Akzeptanzverhalten von Multimediaanwendungen im Physikunterricht hat, näher untersucht werden. Hierzu wird das TAM2/UTAUT-Modell um den Faktor TPACK erweitert.

### 4.2.1 Beschreibung und Modellierung

Das TPACK-Framework stellt eine Weiterentwicklung der PCK-Theorie von Shulman (1986) dar, die um die Komponente ‚Technologiewissen‘ ergänzt wurde. Das PCK bezieht sich zunächst auf die Fähigkeit, inhaltliches Wissen in einem bestimmten Bereich oder Schulfach mit pädagogischen Ansätzen zu kombinieren, um so das Lernen von Schülern zu fördern (Voogt et al., 2013). Shulman (1987) schlug hierfür drei Wissensdomänen außerhalb des technologischen Kontextes vor:

- **Inhaltswissen** (engl. *Content Knowledge*; CK): Domänenspezifisches Fachwissen über das Thema und das Fach, das Lehrer unterrichten sollen. Das Inhaltswissen wird dabei als eine Quelle für pädagogisches Inhaltswissen (PCK) vorausgesetzt (Kind, 2009).

TPACK = Erweiterung der PCK  
Theorie um  
technologiespezifisches  
Wissen

- **Pädagogisches Wissen (PK):**  
Wissen über Unterrichtspraktiken, Unterrichtsmethoden, Prinzipien und Strategien, zum Klassenmanagement und zur Organisation des Unterrichts im jeweiligen Unterrichtsfach.
- **Pädagogisches Inhaltswissen (PCK):** Das Wissen darüber, welche didaktischen Ansätze thematisch passend sind. Es handelt sich um ein Zusammenwirken von Inhalt und pädagogischem Wissen. Das PCK beinhaltet dabei sowohl das Kerngeschäft des Lehrens und Lernens, den Lehrplan und die Leistungsbewertung als auch die Bedingungen, die das Lernen fördern, und stellt hierbei die Verbindung zwischen dem Lehrplan, der Bewertung und der Pädagogik her.

Nach Grossmann und Richert (1988, S. 54) bedeutet das K in PCK, dass Lehrer einen „*body of professional knowledge that encompasses both knowledge of general pedagogical principles and skills and knowledge of the subject matter to be taught*“ benötigen. Dabei beinhalten die „*general pedagogical principles*“ neben dem allgemeinen pädagogischen Wissen auch Kenntnisse von Theorien des Lernens, allgemeine Unterrichts- und Verständigungsprinzipien sowie die verschiedenen Bildungsphilosophien, allgemeines Wissen über Lernende und Kenntnisse der Prinzipien und Techniken des Unterrichtsmanagements.

Mishra und Koehler (2006) erweiterten diese drei Wissensbereiche um den Bereich des Lehrens und Lernens mit Technologien, indem sie das Wissen über Technologien (engl. *Technology Knowledge*; TK) ergänzten. Dies eröffnete neue Schnittmengen mit den Domänen der PCK-Theorie. Die technologiebezogenen Dimensionen TPK, TCK und TPACK werden dabei in diversen Quellen (z. B. Ching Sing Chai et al., 2013; Ching Shing Chai et al., 2013; M. J. Koehler et al., 2014; Schmidt et al., 2009) wie folgt beschrieben:

- Das **technologische Inhaltswissen (TCK)** bezeichnet das Wissen darüber, wie das Thema mit Hilfe von Technologien dargestellt werden kann. Es beinhaltet das Wissen über die wechselseitige Beziehung zwischen Inhalt und Technologie und die Beschränkungen des Inhaltswissens durch die Fähigkeiten dieser Technologie.
- Das **technologische pädagogische Wissen (TPK)** ist hingegen das Wissen über die Verwendung von Technologien zur Umsetzung von Unterrichtspraktiken, -prinzipien und -strategien; es beinhaltet ebenfalls das Verständnis, dass der Unterricht durch Technologie verändert werden kann.
- Das **technologische Wissen (TK)** meint das Wissen über die Funktion und die Verwendung verschiedener traditioneller und neuer Technologien.
- Das **technologisch-pädagogische Inhaltswissen (TPACK)** ist das „Wissen über die komplexen Beziehungen zwischen Technik, Pädagogik und fachlichen Inhalten, die es Lehrenden ermöglichen, geeignete und kontextspezifische Unterrichtsstrategien zu entwickeln“ (Koehler et al., 2014, S. 102); es bildet die Voraussetzung für die Integration von Technologie in die Lehre. J. M. Koehler und Mishra (2009, S. 9) erläutern, dass dieses Konstrukt einen effektiven Unterricht mit Technologie beschreibe, der ein Verständnis der Darstellung von Konzepten mittels Technologien erfordere. Es beinhaltet ferner Wissen darüber, welche dieser Konzepte schwierig oder einfach zu erlernen sind und wie Technologie helfen kann, einige der Probleme zu beheben. Außerdem umfasst das Konstrukt TPACK neben der Kenntnis von Vorwissen und Schülervorstellungen auch das Wissen darüber, wie Technologien genutzt werden können, um auf dem individuellen Vorwissen aufbauen zu können, neue Erkenntnisse zu entwickeln oder alte zu stärken respektive umzudeuten.

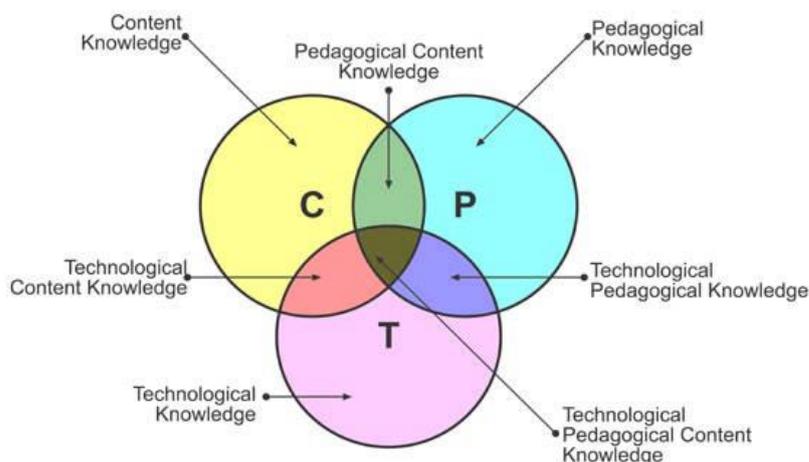


Abbildung 5: TPACK-Framework (Mishra & Koehler, 2006, S. 1025)

### 4.2.2 Lehr-Lern-Umgebungen in einer digitalisierten Welt

Insgesamt werden im TPACK-Framework die komplexen Zusammenhänge zwischen konkreten fachlichen Inhalten, der Pädagogik und der Technologie hervorgehoben, wodurch eine nützliche Organisationsstruktur darüber definiert wird, was Lehrer wissen müssen, um Technologie effektiv in den Unterricht integrieren zu können. Diese Organisationsstruktur ist vor allem deshalb nötig, da die Vielfalt des Physiklehrens und -lernens durch neue Technologien enorm zugenommen hat. Dabei versteht es sich von selbst, dass der Einsatz verschiedenster Technologien das Lehren und Lernen im Physikunterricht verändern wird und bereits verändert hat. Noch vor einigen Jahrzehnten argumentierten Wissenschaftler wie Salomon et al. (1991), dass Technologien im Unterricht das Gleichgewicht zwischen Vorwissen und dem Erlangen neuen Wissens zwar stören würden, dadurch aber auch neue Möglichkeiten entstünden, wie Schülerinnen und Schüler lernen könnten. Bis heute haben neue Technologien nicht nur Berechnungen in der Physik (Taschenrechner) vereinfacht, sondern auch die Art und Weise, wie physikalische Probleme im Unterricht behandelt werden können, verändert. Im Physikunterricht werden neben herkömmlichen elektronischen Messwerterfassungssystemen auch Smartphones, iPods und Tablet-PCs zum Experimentieren und Auswerten von Messreihen verwendet (z. B. Kuhn & Vogt, 2012a, 2012b, 2013). Smartphones und Tablets bieten zudem eine neue Möglichkeit, neues Wissen zu erlangen und zu vernetzen (Crompton et al., 2017; Thees et al., 2017), indem der Physikunterricht und der Lehr-Lern-Prozess beispielsweise durch Augmented Reality angereichert wird (Strzys et al., 2017). Zudem werden unterschiedlichste Multimediaanwendungen, wie beispielsweise PowerPoint, zur Präsentation und Diskussion fachlicher Inhalte, aber auch Simulationen und Animationen zur Veranschaulichung, Variation und Vernetzung physikalischer Zusammenhänge eingesetzt. Neue Arten von Aufgaben, wie die Analyse von Erklärvideos aus YouTube und anderen Quellen (Gustafsson, 2012), stellen dabei ebenfalls eine große Neuerung der vergangenen Jahre dar. Durch neue Technologien, die in den Physikunterricht und den Schulunterricht im Allgemeinen drängen, sollten sich eigentlich gleichzeitig die Lehr-Lern-Umgebungen ändern. Bloßes Wissen über die verwendeten Technologien würde zu einer einfachen Kombination von Hard- und Software führen. Dies zöge aber keine natürliche und gewinnbringende Integration von Technologien in den Unterricht nach sich (Earle, 2002). Damit wären Lehrkräfte nur unzureichend in der Lage, ihre um den Technologieaspekt erweiterten Unterrichtsmethoden an die Bedürfnisse ihrer Schülerinnen und Schüler anzupassen. Mishra und Koehler (2009; 2006) verweisen zudem auf weitere grundsätzliche Probleme für die Integration verschiedener Technologien in den Unterricht. Dabei betonen sie, dass neben der für die Vermittlung

fachlicher Inhalte zur Verfügung stehenden Zeit und durch eine nicht ausreichende oder qualitativ mangelhafte digitale Ausstattung der Schulen eine Unterrichtsintegration von beispielsweise onlinebasierten Anwendungen für Schülerinnen und Schüler nur schwer möglich sei. Hew und Brush (2007) zeigen in ihrer Arbeit zahlreiche weitere Schwierigkeiten auf, die die Integration von Technologien in den Unterricht erschweren: Demnach stellen fehlende Ressourcen zwar die größte Hürde dar, allerdings dicht gefolgt vom Wissen und den Fähigkeiten einer Lehrkraft, diese in den Unterricht zu integrieren. Die Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur (UNESCO, 2008) weist ebenfalls darauf hin, dass der Lernerfolg von Schülerinnen und Schülern in technisierten Lernumgebungen stark von der Fähigkeit des Lehrers abhängt, die verschiedenen Technologien effektiv in den Unterricht einzubinden.

Englund et al. (2016) untersuchten dazu in einer Längsschnittstudie die Vorstellungen (Beliefs) von Lehrkräften, die diese vom Lehren und Lernen mit Technologien besitzen. Sie stellten dabei fest, dass Lehramtsstudierende und Lehrernovizen eher dazu bereit sind, Technologien in einen Lehr-Lern-Prozess einzubinden, als erfahrenere Kollegen, wenn diese erst in neue Technologien eingeführt werden müssen. Naturgemäß besitzen also häufig die Lehrkräfte, die Technologien vermehrt in Lehr-Lern-Prozessen einsetzen, eine vergleichsweise geringe Lehrerfahrung. Diese sei wegen der Komplexität der Integration von Technologien in Lehr-Lern-Prozesse aber notwendig. Die Komplexität des Integrationsprozesses ist durch zahlreiche Arbeiten belegt (Angeli & Valanides, 2009; Artigue, 2002; Jang, 2008; Niess, 2005; Tondeur et al., 2012). Ebenfalls wurden auf dieser Basis verschiedene Modelle der Integration von Technologien in den naturwissenschaftlich-mathematischen Unterricht entwickelt. Wang (2008) schlug in diesem Zusammenhang ein generisches Modell vor, das aus Pädagogik, sozialer Interaktion und der einzusetzenden Technologie besteht. Darauf bauten Niess et al. (2009) einen Rahmen auf, in dem der Lernprozess von Lehrern beschrieben und angeleitet wird, während die Lehrer ihr TPACK im Rahmen von Fortbildungsveranstaltungen entwickeln. Lehrkräfte müssen nach Jones et al. (2006) ein solides theoretisches Rahmenwerk besitzen, damit sie auf zuverlässige und innovative Referenzmodelle zugreifen können, um damit alle Informationen über das Design von technisierten Lernumgebungen in die Unterrichtspraxis umzusetzen. Somit soll das Ziel einer gewinnbringenden und den Lehr-Lern-Prozess verbessernden Integration von Technologien in den Unterricht erreicht werden.

In diversen Forschungsarbeiten wird dabei auf die Komplexität der Integration von Technologien in Lehr-Lern-Prozesse hingewiesen (Angeli & Valanides, 2009;

Artigue, 2002; Jang, 2008; Niess, 2005; Tondeur et al., 2012). Diese Komplexität resultierte in der Entwicklung verschiedener Modelle, die eine zielgerichtete, schülergerechte und gewinnbringende Integration von Technologien in den naturwissenschaftlich-mathematischen Unterricht ermöglichen. Wang (2008) schlug dafür beispielsweise ein generisches Modell vor, das aus der Pädagogik, der sozialen Interaktion und der Technologie selbst besteht. Mit diesem Modell soll Lehrkräften ein ‚Werkzeugkasten‘ zur Verfügung gestellt werden, mit dem diese interaktive, zielgerichtete und konstruktivistische Lernumgebungen schaffen können. Niess et al. (2009) schlugen einen Rahmen vor, in dem der Lernprozess von Lehrern beschrieben und angeleitet wird, während die Lehrkraft ihren TPACK entwickelt, damit diese in die Lage versetzt wird, verschiedene Technologien ziel- und schülergerecht in den Unterricht zu integrieren. Nach Jones et al. (2006) sind solche soliden theoretischen Rahmenwerke, die zuverlässige innovative Referenzmodelle liefern, essenziell für Informationen über das Design technisierter Lernumgebungen.

In der vorliegenden Studie wird dieser von Wang (2008) vorgeschlagene Weg beschritten. In einem Workshop (vgl. Abschnitt 5.2.1) lernen die Lehrkräfte zunächst theoretische Richtlinien kennen, die für das Lehren und Lernen mit Technologien von Bedeutung sind. In einem praktischen Teil arbeiten sie schließlich konkrete Unterrichtsinhalte aus und versuchen dabei, die zuvor gelernten Kriterien anzuwenden.

### 4.2.3 Grenzen des TPACK-Frameworks

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass die Interaktionen zwischen den einzelnen TPACK-Domänen nicht vollständig verstanden werden können und nur schwer bestimmbar sind (Cox, 2008; Kopcha et al., 2014). Bereits 2008 führte Cox eine detaillierte konzeptionelle Analyse der TPACK-Domänen durch und fand dabei 89 verschiedene Definitionen des Konstrukts. Cox (2008) argumentierte, dass Mishra und Koehler die Domänen TCK und TPK innerhalb ihres Frameworks definieren würden, diese aber nicht durch empirische Beweise untermauert oder vollständig erforscht hätten. Hieraus folgerte Cox (2008), dass ohne empirische Beweise die Existenz von TCK und TPK nicht garantiert werden könne. Cox und Graham (2009) stellten fest, dass auch nach einer Vielzahl von Untersuchungen die Definition des TPACK selbst und der zugehörigen Domänen nicht klar genug abgegrenzt werden könne. Insbesondere dieser Umstand stößt in der Literatur auf starken Widerspruch, wobei Kritiker herausstellen, dass durch die Komplexität des TPACK-Frameworks, verglichen mit der Jahrzehnte andauernden Entwicklung einer Definition der zu Grunde liegenden PCK-Theorie, eine umfassende und klar abgegrenzte Definition der einzelnen Konstrukte des TPACK noch nicht möglich

Das Konstrukt TPACK besitzt  
mehr als 89 verschiedene  
Definitionen.

sein könne (Angeli & Valanides, 2009; L. M. Archambault & Barnett, 2010; C. R. Graham, 2011).

C. R. Graham (2011) behauptet ferner, dass das Fehlen einer präziseren Definition des TPACK-Frameworks erhebliche Auswirkungen auf das Verständnis und die Messung der einzelnen Konstrukte des TPACK mit sich bringe. Dies unterstreicht C. R. Graham (2011), indem er auf einen Widerspruch in der Definition des technologischen Inhaltswissens (TCK) verweist, die einen Zusammenhang mit dem pädagogischen Wissen herstellt, obwohl das pädagogische Wissen der Grundidee nach keine Verbindung mit technologischem Inhaltswissen haben sollte. C. R. Graham (2011) schlägt daher einen integrativen Ansatz zur Definition des TPACK-Frameworks vor, indem er das TPACK-Framework als eine Kombination verschiedener Wissensarten auffasst. Mit einem solchen Ansatz wird nahegelegt, dass die TPACK-Konstrukte nicht isoliert betrachtet werden können. Dies unterstreichen auch Ching Shing Chai et al. (2013), die 80 TPACK-Studien miteinander verglichen und feststellten, dass die Wissensdomänen innerhalb des TPACK-Frameworks noch besser verstanden werden müssen, damit das TPACK zu einem einsatzfähigen Modell weiterentwickelt werden kann, und alle Konstrukte des TPACK auch empirisch klar voneinander abgegrenzt werden können. In der Literatur werden ebenfalls verschiedene Gründe genannt, weshalb es zu Korrelationen zwischen den verschiedenen TPACK-Konstrukten kommt. Angeli und Valanides (2009) etwa sind der Auffassung, dass das Problem in der begrifflichen Definition des TPACK liege, und gehen davon aus, dass Mishra und Koehler (2006) das TPACK-Framework nicht ausführlich genug erarbeitet haben, um dieses Konstrukt vollständig verstehen zu können. Markauskaite et al. (2011) nehmen hingegen an, dass die Methoden, die in früheren TPACK-Studien eingesetzt wurden, nicht zum Verständnis der Interaktionen der einzelnen Wissensdomänen beitragen. Bibi und Khan (2015) untersuchten deshalb verschiedene empirische Studien, um die verschiedenen Methoden zu ermitteln, die bei der Untersuchung dieses Konstruktes verwendet wurden. Dabei fanden sie heraus, dass im Wesentlichen zwei verschiedene Methoden eingesetzt wurden: zum einen klassische Fragebögen und zum anderen persönliche Interviews. In diesem Zuge stellten sie auch fest, dass Studien, denen Fragebögen zu Grunde lagen, meist deutlich mehr Teilnehmer aufwiesen als Studien, in denen Interviews durchgeführt wurden.

Fehlende einheitliche Definition hat negative Auswirkungen auf das Verständnis und die Messung des TPACK.

In der vorliegenden Studie, die in Unterkapitel 5.2 näher beschrieben wird, findet ebenfalls ein Fragebogen Anwendung. Dieser wird den Teilnehmern jedoch in elektronischer Form vorgelegt.

Fragebögen in elektronischer Form

Obwohl, oder vielleicht gerade weil es auch negative Stimmen gegenüber dem TPACK gibt, hat sich das TPACK-Framework weiterentwickelt. Die Forschung am

TPACK-Framework war zunächst auf die Erarbeitung einer grundlegenden Definition, die Erklärung und Interpretation der Konstrukte und die Diskussion der Eigenschaften von TPACK und seiner Verwendung in verschiedenen Anwendungsbereichen fokussiert. Inzwischen hat das TPACK eine zweite Generation erreicht, in der die Konzentration darauf gerichtet ist, das Konstrukt in Forschungs- und Entwicklungsprojekten zu verwenden (Bibi & Khan, 2015; Claro et al., 2018; Kiray, 2016; Thompson, 2013). In diesem Sinne wird das TPACK auch in der vorliegenden Studie verwendet. Es dient also als Instrument zur Beschreibung der Einstellungen und Fähigkeiten von Lehrkräften gegenüber modernen Technologien im Unterrichtseinsatz. Aufgrund der enormen Bandbreite neuer und moderner Technologien wird in dieser Studie jedoch nur der Bereich der Multimediaanwendungen im Schulunterricht im Fach Physik beleuchtet.

### 4.3 Multimedia im Unterricht

Der Multimediabegriff soll sich zunächst, nach R. E. Clark (1994), R. Mayer (1997), R. Mayer (2014) und Moreno und Mayer (2007), auf jede Präsentation beziehen, die verbale und nonverbale Informationen zu einer kohärenten Botschaft kombiniert, um so Lernprozesse anzuregen. Demzufolge sind neben den erwartbaren Medien, wie Simulationen und Animationen, Verlinkungen und Medien zur Erweiterung der Realität (Augmented Reality), auch illustrierte Bücher, Vorträge, statische Diagramme und Bilder als multimedial anzusehen.

#### 4.3.1 Multimedia und multimediales Lernen

Da sich mit einer derart weit gefassten Definition des Multimediabegriffs nur schwer ein Themenbereich für eine Lehrerfortbildung abgrenzen lässt, soll für diese Studie die Definition jedoch noch etwas eingegrenzt werden. Hierbei stellt die oben beschriebene Einteilung der präsentierten Information einer Multimediaanwendung in verbale und nonverbale Information einen möglichen Ansatzpunkt dar. Zu diesem Zweck muss die Art der Modalität, also ob die Information visuell oder auditiv dargeboten wird, unterschieden werden (Moreno & Mayer, 2007). Dabei können verbale Informationen sowohl in geschriebener (visuell) als auch gesprochener Form (auditiv) auftreten, nonverbale Informationen hingegen können als statisches oder dynamisches Bild (beide visuell) dargestellt werden (vgl. R. Mayer, 2014). Setzt sich nun ein Schüler mit einer Multimediaanwendung auseinander und baut dabei verschiedene mentale Repräsentationen eines Lerngegenstandes auf, wird dieser Vorgang als multimediales Lernen bzw. Lernen mit Multimedia bezeichnet. R. E. Mayer (2001, S. IX) definiert dies als „*an alternative to purely verbal presentations [...] in which people learn from both words and pictures*“. In späteren Veröffentlichungen (R. E. Mayer et al., 2005; Moreno & Mayer, 2007) grenzt Mayer die Definition für Multimediaanwendungen weiter ein und setzt dabei einen Fokus auf computergestützte multimediale Lernumgebungen. Da die Definitionen von Mayer im Bereich der Bildungsforschung auf breite Akzeptanz stoßen, sollen seine Definitionen auch dieser Arbeit zu Grunde gelegt werden:

Multimedia verbindet Wörter  
und Bilder zu einer kohärenten  
Botschaft

Tabelle 1: Übersicht der Definitionen zum multimedialen Lernen nach R. Mayer (2014)

Begriff	Begriffs-Übersetzung	Definition
Multimedia	Multimedia	Presenting words (such as printed text or spoken text) and pictures (such as illustrations, photos, animation or video)
Multimedia learning	Multimediales Lernen	Building mental representations from words and pictures
Multimedia instruction	Multimedialer Unterricht	Presenting words and pictures that are intended to promote learning

Einschränkung der Definition auf onlinebasierte Multimediainhalte

Da selbst diese Definition noch weit gefasst ist, wird für die vorliegende Arbeit eine weitere Einschränkung vorgenommen. In Anlehnung an die Definition des Multimediabegriffs nach Issing und Strzebkowski (1997) sollen lediglich onlinebasierte multimediale Inhalte betrachtet werden, die die Integration verschiedener Medien in einer gemeinsamen Nutzerschnittstelle ermöglichen.

### 4.3.2 Multimedia im Bildungsbereich

Computer und Internet sind aus der heutigen Gesellschaft und dem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken. Die Studie „Jugend in Medien“ (JIM) zeigt, dass der Trend zur Digitalisierung längst auch in den Kinderzimmern angekommen ist. Demnach ist in 99 % der Familien mindestens ein Smartphone und in 98 % der Familien ein Computer mit Internetzugang vorhanden (Behrens & Rathgeb, 2017). In dieser Studie wurde ferner herausgefunden, dass 97 % der Jugendlichen (14- bis 18-Jährigen) selbst ein Smartphone und 70 % einen eigenen PC oder Laptop besitzen. Wenn sich Jugendliche in ihrer Freizeit mit Medien beschäftigen, dann ist das Smartphone inzwischen die hauptsächliche Informationsquelle.

Auch bei Erwachsenen und damit ebenfalls bei Lehrerinnen und Lehrern – dies geht aus einer Marktforschungsstudie von SevenOne Media (2017) hervor – nehmen das Smartphone und andere Zugriffsmöglichkeiten auf das Internet eine herausgehobene Stellung als Informationsmöglichkeit ein. Vor diesem Hintergrund ist es nachvollziehbar, dass die Kultusministerkonferenz (KMK) der digitalen Bildung eine zentrale Rolle für die zukünftige Entwicklung der Gesellschaft beimisst (KMK, 2016, S. 10):

*„Der Bildungs- und Erziehungsauftrag der Schule besteht im Kern darin, Schülerinnen und Schüler angemessen auf das Leben in der derzeitigen und künftigen Gesellschaft vorzubereiten und sie zu einer aktiven und verantwortlichen Teilhabe am kulturellen, gesellschaftlichen, politischen,*

*beruflichen und wirtschaftlichen Leben zu befähigen. Dabei werden gesellschaftliche und wirtschaftliche Veränderungsprozesse und neue Anforderungen aufgegriffen.“*

Damit eine Lehrkraft diesen Bildungs- und Erziehungsauftrag erfüllen kann, benötigt sie neben Fach- und pädagogischem Wissen auch ein umfangreiches Spezialwissen, beispielsweise darüber, welche Wirkungen Multimedia in speziellen Unterrichtssituationen haben kann, welche methodischen Ansätze gewählt und wie die dazu nötigen technischen Gerätschaften eingesetzt werden können. Besonders im Hinblick auf die in technischer Hinsicht immer weiter auseinanderdriftenden Fähigkeiten der individuellen Lehrkräfte (vgl. Claro et al., 2018) sind individualisierte Lehreraus- und Fortbildungsprogramme notwendig, damit Lehrkräfte diese Bildungsziele mit ihren Schülerinnen und Schülern erreichen können.

### **4.3.3 Multimedia im Unterricht**

Aus zahlreichen Studien wird heute eines klar: Der bloße und unreflektierte Einsatz von Multimedia um ihrer selbst willen hat keinen positiven Einfluss auf den Lernerfolg von Schülerinnen und Schülern:

Lewis (1995) untersuchte beispielsweise, ob die Einführung von Videotutoren bei Schülerexperimenten eine Auswirkung auf die Noten von Schülerinnen und Schülern hat, konnte jedoch keine Veränderung diesbezüglich feststellen. Demnach ist es unerheblich, ob ein Schüler Anweisungen von einem Video- oder realen Tutor erhält, sofern dieser kompetent und zugänglich ist.

Kim et al. (2007) analysierten den Lernerfolg von Schülerinnen und Schülern im Hinblick auf die Funktionsweise einer Fahrradpumpe. Dabei setzten sie eine Multimediaanwendung ein, mit der statische Grafiken auf unterschiedliche Weise präsentiert werden können. Verschiedenen Schülergruppen wurden die Grafiken entweder auf einmal oder nacheinander sowie selbst stimuliert oder animiert präsentiert. Sie nahmen an, dass die animierte Präsentation eine bessere Wirkung haben würde, da sie als interessanter, ästhetischer und motivierender eingeschätzt würde (Kim et al. 2007; S. 261). Die Art der Präsentation beeinflusste zwar die Wahrnehmung der Materialien durch die Schülerinnen und Schüler und steigerte das Interesse sowie deren Motivation, hatte aber keinen Einfluss auf den daraus resultierenden Lernerfolg.

R. E. Clark (1983) kam bereits früh zu dem Schluss, dass Medien im Allgemeinen keinen signifikanten Einfluss auf den Lernerfolg haben. Er leitete daraus Folgendes ab: *„Media are mere vehicles that deliver instruction but do not influence student achievement any more than the truck that delivers our groceries*

*causes changes in our nutrition.*“ (R. E. Clark, 1983, S. 445) Clarks Veröffentlichung löste eine Debatte in der Forschungsgemeinschaft aus, da sie die bis dahin gültige, fundamentale Annahme, wonach Medien einen positiven Einfluss auf den Lernerfolg von Schülerinnen und Schülern haben, in Frage stellte.

R. E. Clark (1994) konstatierte ferner, dass der Lernerfolg, den Schülerinnen und Schüler durch Multimedia erlangen, mit adäquater Vorbereitung genauso gut mit anderen, statischen Medien erlangt werden könne. Als Beispiel führte er die Technik des Zoomens in Videos auf, wodurch sich Schüler auf eine Komponente eines größeren Systems konzentrieren sollten. Der gleiche Lernerfolg kann jedoch auch schematisch mit einer Vergrößerungsblase in einem gedruckten Bild dargestellt werden. Er schlug daher vor, gezielt Anwendungsbereiche und Beispiele zu suchen, bei denen der Lernerfolg eindeutig auf den Einsatz von Multimedia zurückgeführt werden kann.

Kozma (1994, S. 11) argumentierte schließlich, dass unterschiedliche Medien unterschiedliche Lernerfahrungen der Schülerinnen und Schüler ermöglichen könnten: *„A particular medium can be described in terms of its capability to present certain representations and perform certain operations in interaction with learners who are similarly engaged in internally structuring representations and operating on these.“*

R. E. Mayer und Moreno (2002, S. 88) fassen diese sich scheinbar widersprechenden Forschungsergebnisse mit der folgenden Aussage zusammen: *„The consensus among media researchers is that animation may or may not promote learning, depending on how it is used.“*

### **4.3.3.1 Interaktivität**

In die gleiche Richtung wie R. E. Mayer und Moreno (2002, S. 88) wies bereits Feldman (1994), der sagte, dass es nicht nur von Bedeutung sei, unterschiedliche Medien zu verwenden, sondern dass diese auch interaktiv miteinander verbunden werden müssten. Diese Interaktivität bezeichnete er als *„key feature“* von Multimedia. Dadurch können Nutzer aktiv Einfluss auf die dargebotenen Inhalte nehmen; idealerweise passen sich die Informationen, die einem Schüler vorgeführt werden, dynamisch an dessen Aktionen an. Dies gelingt insbesondere dann, wenn es, wie von Issing und Strzebkowski (1997) vorgeschlagen, eine gemeinsame, digitale Nutzerschnittstelle, wie einen Computer, Tablet-PC oder ein Smartphone, gibt. Daraus resultiert auch die Forderung Schulmeisters nach einer Erweiterung der Multimediadefinition um den Aspekt der Interaktivität. Er fordert: *„Ohne diesen Aspekt der Interaktion ist die Definition von Multimedia unzureichend. Wir sollten von Multimedia stets als von einem interaktiven Medium sprechen.“* (Schulmeister, 1997, S. 16) Negroponte et al. (1997)

unterstützen Schulmeisters Forderung, indem sie argumentieren, dass ansonsten auch passives Fernsehen unter die Nutzung von Multimedia fallen würde.

Die Interaktivität von Multimedia stellt demnach einen wesentlichen Unterschied zur herkömmlichen Mediennutzung dar. Denn durch Interaktivität können Inhalte nicht nur einfach manipuliert, sondern beispielsweise auch erneut aufgerufen werden. Zudem können Abfolgen verändert, Inhalte selbständig wiederholt und zusätzliche und weiterführende Informationen eingebunden werden. Feldman bezeichnet dies als Wahlfreiheit auf dem Weg durch den „*Wissensdschungel*“. Er schränkt jedoch auch ein, dass die verschiedenen Wege, die ein Lernender einschlagen kann, durch das System vorgegeben und begrenzt werden (Feldman, 1994)

R. E. Mayer et al. (2003) untersuchten eine physikspezifische Multimediaanwendung zur Funktion des Elektromotors und konnten dabei einen positiven Effekt auf den Lernerfolg bei den Schülerinnen und Schülern nachweisen, die interaktive Elemente in der Lernumgebung nutzten. Castaño-Muñoz et al. (2014) zeigten in einer großangelegten Studie, dass bei der Integration von computergestützten, interaktiven Lernumgebungen und Lerneinheiten in den herkömmlichen Unterricht (*Blended Learning*) positive Effekte auf den Lernerfolg auf den Einfluss der Interaktivität zurückgeführt werden können. In einer Studie von Nussbaum et al. (2015) konnte ferner das Ergebnis erhoben werden, dass die Interaktivität von Multimediaanwendungen genau dann besonders effektiv ist, wenn die Interaktivität einer Lernumgebung mit einem interaktiven, offenen Lernmodell wie beispielsweise gemeinsamem Lernen in Kleingruppen kombiniert wird.

### **4.3.3.2 Repräsentationsformen**

Neben der Interaktivität bieten multimedial präsentierte Inhalte auch die Möglichkeit, verschiedene Codierungen, also verschiedene Repräsentationsformen, für einen Lerngegenstand zu verwenden. Dies ist besonders in der Physik von Vorteil, da hier die Zusammenhänge häufig komplexe und umfangreiche Strukturen aufweisen und ebenso häufig aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden müssen, damit der Lernende ein umfassendes Verständnis entwickeln kann. Deshalb bietet es sich an, verschiedene Repräsentationen eines Lerngegenstandes frühzeitig in den Unterricht einzubinden. Dies hat nicht nur den Vorteil, den Zusammenhang aus unterschiedlichen Perspektiven betrachten zu können, sondern verhindert auch, dass inhaltliche und methodische Konzepte lediglich mit einer Darstellungsform verknüpft werden. Nach Girwidz (2015, S. 852) können durch „[...] *den kompetenten und flexiblen Umgang mit unterschiedlichen Repräsentationen [...] abstrakte Objekte, Modelle und Prozesse auf ihre repräsentationsinvarianten*

*Strukturen hin abstrahiert werden“.* Kozma (2003) schreibt dazu, dass Experten unterschiedliche Repräsentationsformen koordiniert einsetzen würden, aber Lernende Schwierigkeiten dabei hätten, einzelne geeignete Repräsentationsformen auszuwählen und dann zusammenzuführen. Kozma (2003) führt dies darauf zurück, dass Anfänger häufig zu stark auf oberflächliche Merkmale konzentriert sind und bekannte Darstellungsformen nur auf wenige Problemstellungen übertragen können. Im Gegensatz dazu sind nach Kozma (2003) und Savelsbergh und Jong (1998) Experten dazu in der Lage, flexibel zwischen verschiedenen Darstellungsformen zu wechseln, um in Abhängigkeit vom Zweck Darstellungsformen gezielt auszuwählen. Die Betrachtungen von Kozma (2003) beziehen sich zwar auf das Fach Chemie, dürften allerdings ohne größere Abstriche auch auf die Physik übertragbar sein.

Demnach muss ein Ziel des Physikunterrichts darin bestehen, Schülerinnen und Schüler in die Lage zu versetzen, in angemessener Weise verschiedene Repräsentationsformen zu verwenden, und sie darin zu fördern, gezielt zwischen diesen zu wechseln.

Der Einsatz verschiedener Repräsentationsformen hat allerdings auch während des Lernvorgangs positive Effekte. So können spezifische Informationen am besten in ebensolchen Darstellungsformen übermittelt werden. Durch die Wahl geeigneter Darstellungsformen in einer Präsentation oder einer Unterrichtssequenz werden bestimmte Lernformen erleichtert, und durch eine größere Anzahl von zur Verfügung stehenden Repräsentationsformen kann das erworbene Wissen flexibler auf neue Zusammenhänge angewendet werden (Spiro, Rand J. Coulson, Feltovich, Anderson, 1988).

Im Rahmen von Aus- und Fortbildungsangeboten müssen demnach (angehende) Lehrkräfte in die Lage versetzt werden, diese Vorteile spezieller Repräsentationen gezielt auszunutzen. Dafür ist es hilfreich, verschiedene Funktionen zu kennen, die die jeweiligen Repräsentationsformen im Unterricht ausfüllen können. Ainsworth (1999) gibt hierfür einen systematischen Überblick.

Nach Ainsworth können sich verschiedene Repräsentationen gegenseitig ergänzen. Beispielsweise stellen die drei Bewegungsdiagramme verschiedene Repräsentationsformen der gleichen Bewegung dar, tragen aber jeweils weitere, spezifische Informationen zum Verständnis der betrachteten Bewegung bei.

Durch die Verknüpfung verschiedener Repräsentationsformen können die Interpretation und das Verständnis einer neuen, zunächst unbekanntes Repräsentationsform erleichtert werden (Ainsworth, 1999). Dies kann sowohl auf Basis äußerer Ähnlichkeiten oder auch durch strukturelle Ähnlichkeiten

geschehen. Im Rahmen des Beispiels der Bewegungsdiagramme kann so beispielsweise auf die Fläche unterhalb des Graphen im Zeit-Beschleunigung-Diagramm geschlossen werden, wenn deren Bedeutung im Zeit-Geschwindigkeit-Diagramm bereits geklärt wurde.

Um schließlich ein tieferes Verständnis eines Zusammenhangs zu erleichtern, kann es sinnvoll sein, Darstellungsformen zu wählen, die ein neues Abstraktionsniveau einführen oder eine Erweiterung einer bekannten Darstellungsform darstellen (Ainsworth, 1999). Auch die Darstellung von Relationen zu bereits bekannten oder neuen Zusammenhängen kann dann lernförderlich wirken (Ainsworth, 1999). Als Beispiel kann hierzu die Kraftwirkung bei einer Kreisbewegung als Erweiterung der linearen Kraftwirkung herangezogen werden.

Die zahlreichen verschiedenen Repräsentationsformen lassen sich optisch und technisch zunächst in zwei Gruppen einteilen: in statische und dynamische Repräsentationsformen.

**Statische Repräsentationsformen** sind beispielsweise Bilder, Grafiken, Tabellen und Formeln, aber auch Texte. Für statische Repräsentationsformen sind technische Hilfsmittel nicht zwingend notwendig, da sie auch in gedruckter Form oder verbal kommuniziert werden können.

Das wesentliche Kennzeichen für **dynamische Repräsentationsformen** ist die zeitlich veränderbare Darstellungsform, die in der Regel technische Geräte wie Computer, Tablet-PC oder Smartphone voraussetzt. Klassische Beispiele für dynamische Repräsentationsformen sind Videos und Animationen. Nach Park und Hopkins (1993) sind dynamische Repräsentationsformen dann besonders lernwirksam, wenn durch ihren Einsatz unsichtbare Abläufe sichtbar gemacht werden können oder mit ihnen das Verhalten von Systemen oder visuelle Analogien veranschaulicht werden können. Park und Hopkins (1993) weisen weiter darauf hin, dass dynamische Darstellungsformen auch dann besonders lernwirksam seien, wenn sie sprachlich schwer beschreibbare Abläufe oder Phänomene darstellen. Die lernfördernde Wirkung von passend gestalteten Animationen zeigen Höffler und Leutner (2007) in ihrer Meta-Studie, in der sie statische Bilder und Animationen vergleichen. Dennoch weisen Tversky et al. (2002) in ihrem Review auf widersprüchliche Forschungsergebnisse zur Lernwirksamkeit dynamischer Repräsentationsformen hin. Sie folgern jedoch, dass der Einsatz von dynamischen Repräsentationsformen sehr sorgfältig geplant werden müsse und sie insbesondere dort verwendet werden sollten, wo die Veränderung einen Informationsmehrwert für den Lernenden bietet. Tversky et al. (2002) postulieren weiter, dass, wenn dynamische Repräsentationsformen in

geeigneter pädagogischer und technischer Weise eingesetzt würden, diese sehr wohl lernwirksam seien. Das hierzu von der Lehrkraft benötigte pädagogische Wissen, wie dieses technische Mittel der dynamischen Darstellungsformen geeignet in den Unterricht eingebaut werden muss, stellt eine Brücke zum TPACK-Framework her. Es ist ein erklärtes Ziel der vorliegenden Studie, herauszufinden, ob eine Steigerung des TPACK mit einer Steigerung der Akzeptanz diverser multimedialer Elemente einhergeht.

Neben der Unterscheidung in statische und dynamische Repräsentationsformen können diese auch nach ihren inhärenten Eigenschaften, ob sie also deskriptiv oder depiktiv sind, differenziert werden.

**Deskriptive Repräsentationsformen** sind dabei beschreibende Darstellungen, die zur Übermittlung von Informationen symbolische Zeichen wie Buchstaben, Ziffern oder auch Formelzeichen benötigen und auf einer allgemein bekannten Konvention beruhen. Zum vollständigen Verständnis der gelieferten Informationen und Zusammenhänge ist demnach das Wissen über die konkrete Bedeutung der jeweiligen individuellen Symbole notwendig.

**Depiktive Repräsentationsformen** sind hingegen Bilder oder physische Modelle von Gegenständen, die auf einer ikonischen Darstellung beruhen. Dabei besitzt die verwendete Ikone eine ähnliche Gestalt wie der zu veranschaulichende Lerngegenstand. Depiktive Repräsentationsformen können auch Beziehungen und Relationen veranschaulichen. Um alle Informationen aufzufassen, wird, anders als bei deskriptiven Repräsentationsformen, keine grundlegende gemeinsame Konvention benötigt. Zudem sind sie nicht auf statische Repräsentationsformen beschränkt. So stellen Videos und Animationen ebenfalls depiktive Repräsentationsformen dar.

Nach Schnotz und Bannert (2003) kann die Unterscheidung nach deskriptiv und depiktiv auch auf eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit von Repräsentationsformen angewendet werden: die Unterscheidung nach internen und externen Repräsentationsformen:

**Externe Repräsentationsformen** umfassen gesprochene oder geschriebene Texte, Bilder, Animationen und Videos und sind außerhalb des Lernenden angesiedelt. Dies bedeutet, sie befinden sich beispielsweise in Büchern, Computern, Tablet-PCs oder Smartphones. Beim Arbeiten oder Lernen mit externen Repräsentationen entstehen im Kopf des Lernalters **mentale Modelle** bzw. **interne Repräsentationen** des Lerngegenstandes. Diese Repräsentationen können nach Paivio (1990) vom Lernenden auf unterschiedliche Weise genutzt werden, um mit seiner Umwelt zu interagieren. Die mentalen Modelle können

dabei wiederum in **bildhafte** und **verbale mentale Modelle** unterteilt werden. Verbale mentale Repräsentationen basieren analog zu den deskriptiven Repräsentationen auf Symbolen und Codes. Sie haben damit meist einen sequenziellen Charakter, was eine Verarbeitung in einer konkreten Reihenfolge nach sich zieht. Bildhafte mentale Repräsentationen enthalten dementsprechend alle anderen Repräsentationen, die nicht auf ein Symbolsystem zurückzuführen sind. Nach J. M. Clark und Paivio (1991) beinhalten bildhafte Repräsentationen auch handlungsbezogenes Wissen wie das Zeichnen von Kreisen oder Geraden oder das Drücken von Buttons.

Insgesamt ist ein mentales Modell ein internes Modell der Realität, wie sie vom Lernenden wahrgenommen wird. Damit ein möglichst großer Lernerfolg eintreten kann, sollten diese mentalen Modelle von extern beeinflusst werden, denn durch diese internen Modelle wird die Leistung bei zum Modell passenden Aufgaben gesteigert (Schnotz & Kürschner, 2008). Dies kann nach Schnotz und Kürschner (2008) beispielsweise durch die Verwendung depiktiver Repräsentationsformen geschehen. Lehrkräfte sollten deshalb vornehmlich Repräsentationsformen verwenden, die anschlussfähig für im Unterricht folgende Lerngegenstände und Aufgabentypen sind und vom Lernenden intuitiv richtig interpretiert werden können. Ferner sollten Lehrkräfte gelegentlich auf bereits bekannte Repräsentationen zurückgreifen, um einen Lernprozess effektiver gestalten zu können, damit eine bessere Vernetzung der neu gelernten Inhalte möglich wird.

#### **4.3.4 Theorie zum multimedialen Lernen nach Mayer**

Um die Lernprozesse beim Arbeiten mit multimedialen Inhalten auch theoretisch erklären zu können, entwickelten R. E. Mayer und Chandler (2001) sowie R. E. Mayer (2009) eine Theorie zum multimedialen Lernen. Das Ziel dieser Theorie besteht darin, die Entwicklung menschlichen Denkens durch die Nutzung von Multimedia zu unterstützen. Dazu wählten sie einen lernerzentrierten Ansatz und trafen drei Grundannahmen:

1. **Eingehende Informationen werden in zwei getrennten Informationskanälen verarbeitet:** einem bild- und einem sprachbasierten Kanal. Diese Annahme führten sie auf die Dual Coding Theory von Paivio (1990) und J. M. Clark und Paivio (1991) zurück.
2. Das **Arbeitsgedächtnis hat** in jedem Sinneskanal **eine endliche Kapazität**. Diese Annahme beruht auf der Cognitive Load Theory von Chandler und Sweller (1991) (vgl. Abschnitt 4.3.5) sowie auf der Theorie des Arbeitsgedächtnisses von A. Baddeley (1983).
3. Das **Lernen beruht auf einer aktiven Informationsverarbeitung**, bei der der Schüler oder die Schülerin aus dem dargebotenen Stoff bedeutsame

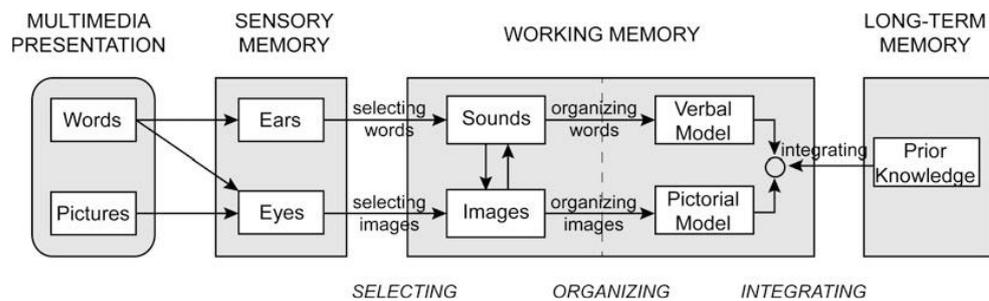


Abbildung 6: Modell der Theorie des Multimedialen Lernens (R. E. Mayer, 2009, S. 61)

Informationen auswählt und diese dann selbständig in eine für ihn schlüssige mentale Repräsentation umarbeitet und auch Verknüpfungen mit bereits vorhandenem Wissen herstellt. Mayer begründet diese Annahme mit der Generativen Theorie des Lernens von Wittrock (1974, 1989).

Diese drei Grundannahmen verwendet Mayer als Basis für sein Modell des Multimedialen Lernens (R. E. Mayer, 2009), das in Abbildung 6 veranschaulicht ist. Mayer stellt dabei als zentrale These heraus, dass Multimediaanwendungen, die geeignete visuelle und verbale Unterstützungen bieten, die Verarbeitungstiefe erhöhen und die Fähigkeit zur Modellkonstruktion im Lernprozess fördern.

Multimedia fördert die Verarbeitungstiefe und die Modellbildung

In Mayers Modell wird vorausgesagt, dass es zunächst für bild- und textbasierte Informationen zwei parallele Verarbeitungswege gibt. Nachdem Paivio (1990) Texte dem verbalen System, A. Baddeley (1983) Texte aber dem visuellen System zugeordnet hatte, traf Mayer den Kompromiss, dass Texte in beiden sensorischen Systemen aufgenommen werden. Dies erklärt den Pfad *Words* → *Eyes* in Abbildung 6.

In Mayers Modell werden die Informationen zunächst über den jeweiligen sensorischen Kanal aufgenommen, im sensorischen Gedächtnis verarbeitet und dabei selektiert. Diese Formen werden dann in das Arbeitsgedächtnis überführt und getrennt in bildlichen und textbasierten Repräsentationen verarbeitet („*text base*“ vs. „*image base*“), indem sie kanalweise getrennt miteinander wechselwirken können. Dabei durchlaufen die rohen, sensorischen Informationen codespezifische Organisationsprozesse, was Mayer als „*organizing*“ bezeichnet. Diese Informationen werden miteinander vernetzt und in einen Zusammenhang gebracht. Als Ergebnis liegen dann ein verbales sowie ein nonverbales/bildhaftes mentales Modell vor. Bilder führen zum nonverbalen/bildhaften mentalen Modell, während sowohl gesprochener als auch gelesener Text zu einem verbalen mentalen Modell führen (R. Mayer, 2014). Abschließend werden nach Mayer die beiden mentalen Modelle mit dem Vorwissen integriert, es werden also Verbindungen zwischen den beiden mentalen Modellen und dem Vorwissen hergestellt. Dabei entsteht ein neues,

(hoffentlich besseres) Modell des Lerngegenstands. Ein wesentlicher Lernvorteil von Multimedia gegenüber der Verwendung eines isolierten Mediums besteht darin, dass daraus zeitgleich mehrere Modelle gebildet und integriert werden können. Wird hingegen nur ein Sinneskanal durch ein isoliertes Medium angesprochen, könnten am Ende weniger Informationen zu einem neuen Modell integriert werden.

R. E. Mayer (2004) betont jedoch, dass es sich bei dem vorgeschlagenen Lernprozess um eine kognitive Aktivität handele, die nicht mit der Verhaltensaktivität verwechselt werden dürfe. Er stellt fest, dass das Verhalten, also die Tätigkeiten oder Interaktionen mit dem Lerngegenstand, keine Voraussetzung für einen lernwirksamen multimedialen Unterricht sind. Einzig eine gelungene kognitive Aktivierung des Lernenden sei ein Maßstab für einen guten, multimedial aufgebauten Unterricht. Mayer selbst gibt jedoch zu bedenken, dass Motivation und Metakognitionen in seinem Modell zu wenig berücksichtigt würden (R. E. Mayer, 2014). Er hält daher fest, dass diese Faktoren das Modell erweitern und die jeweiligen kognitiven Verarbeitungsschritte beeinflussen können. Hierzu müssen ihm zufolge weitere Forschungen angestellt werden.

#### **4.3.5 Cognitive Load Theory**

Damit Lehrkräfte lernwirksame Unterrichtsmaterialien auch mit Hilfe von multimedialen Elementen erstellen können, benötigen sie ein grundlegendes Wissen über die kognitiven Strukturen und Prozesse im menschlichen Gehirn, die während des Lernvorgangs auftreten können. Diese wurden im vorhergehenden Abschnitt zusammengefasst dargestellt. Paas und Sweller (2014) aber auch Paas und Ayres (2014) betonen die Notwendigkeit dieses Wissens, indem sie auf die Bedeutung der Architektur des menschlichen Gehirns sowie auf das Zusammenwirken von sensorischer Wahrnehmung, Arbeits- und Langzeitgedächtnis hinweisen.

Die Wechselwirkung zwischen diesen drei Bereichen (sensorische Wahrnehmung, Arbeits- und Langzeitgedächtnis) ist komplex und kann daher in dieser Arbeit nicht in vollem Umfang ausgeführt werden. Stattdessen wird eine Zusammenfassung gegeben und für weitergehende Informationen auf die gängige Fachliteratur verwiesen. John Sweller und Paul Chandler erforschten die Verarbeitungsprozesse intensiv und postulierten hieraus mit Blick auf die Gestaltung lernwirksamen Lernmaterials die Cognitive Load Theory (= Theorie der kognitiven Belastung) (grundlegend: Chandler & Sweller, 1991; Paas et al., 2003; Sweller, 1988, 1994; ausführliche Reviews und Zusammenfassungen: Plass et al., 2010; Sweller et al., 2011).

Eine zentrale Grundannahme der Cognitive Load Theory ist, dass im Langzeitgedächtnis neben Wissen auch Fähigkeiten gespeichert werden. Damit neues Wissen im Langzeitgedächtnis gespeichert werden kann, muss der Lernende dieses neue Wissen über eine sensorische Wahrnehmung zunächst aufnehmen und durch eine aktive Verarbeitung in sein Gedächtnis integrieren. Letzteres wird zunächst in zwei Bereiche eingeteilt: in das Arbeitsgedächtnis, in dem diese Verarbeitung nach Miller (1956) stattfindet, und das Langzeitgedächtnis, in dem die Informationen schließlich gespeichert werden.

Nach A. Baddeley (1983) lässt sich das Arbeitsgedächtnis (engl. *Working Memory*) selbst in drei Bereiche unterteilen. Die Ausführungszentrale (*Central Executive*) steuert die Aufmerksamkeit einer Person, das visuell-räumliche Skizzenblatt (*Visuo-spatial Scratch-pad*) bildet das visuell Wahrgenommene ab und der akustische Bereich (*Articulatory Loop*) ist für die Verarbeitung akustischer Signale zuständig.

In den vergangenen Jahrzehnten war das Arbeitsgedächtnis Forschungsgegenstand zahlreicher Untersuchungen, bei denen sich herausstellte, dass etwa drei bis sieben verschiedene, subjektiv als Einheit wahrgenommene Begriffe (= *Chunks*) simultan im Arbeitsgedächtnis verfügbar sind (A. D. Baddeley, 1997; Glaser, 1994; Miller, 1956). Darin sollten jedoch nur zwei bis vier neu zu lernende Elemente enthalten sein (Paas & Sweller, 2014). Chandler und Sweller (1991) sowie Sweller (1994) stellen deshalb die Grenzen des Arbeitsgedächtnisses als wichtigen Faktor heraus, der bei der Unterrichtsgestaltung berücksichtigt werden müsse. Da die Verarbeitungskapazität von Informationen beschränkt ist, muss das vom Lehrer offerierte Informationsangebot so vorstrukturiert sein, dass die Belastung für das Arbeitsgedächtnis nicht zu hoch wird, indem auf unnötige Belastungen verzichtet wird. Es werden im Wesentlichen drei Formen kognitiver Belastung unterschieden: „*Extraneous Cognitive Load*“ (Chandler & Sweller, 1991, S. 293), „*Intrinsic Cognitive Load*“ (Sweller, 1994, S. 295) und „*Germane Cognitive Load*“ (Sweller et al., 1998, S. 259). Als *Extraneous Cognitive Load* bezeichnen sie sachfremde Faktoren, die in keiner Relation zum eigentlichen Lerngegenstand stehen, wie beispielsweise die Art der Präsentation einer Informationseinheit oder (belastende) Einflüsse aus dem Elternhaus oder Freundeskreis. Nach M. Leung et al. (1997) kann die Präsentationsform durch beispielsweise ungewohnte Notationen in Formeln (x statt s für den Weg) zu einer größeren kognitiven Belastung führen als der Lerngegenstand selbst, da im Beispiel Symbolik und Inhalt gleichzeitig verarbeitet werden müssen. Auch offene Lernformen, bei denen sich Schülerinnen und Schüler untereinander koordinieren müssen, wie beispielsweise bei Gruppenarbeiten, können mit Blick auf das Erlernen von

Fachinhalten zu einem zusätzlichen *Extraneous Cognitive Load* führen (Schnotz & Bannert, 1999) wie ein Login-Vorgang an Schulcomputern oder auf Webseiten.

Doch nicht nur sachfremde Faktoren können einen erheblichen Teil des Arbeitsgedächtnisses belegen, sondern auch der Lerngegenstand selbst. Sweller (1994) bezeichnet diese Belastung als „*Intrinsic Cognitive Load*“. Paas und Sweller (2014, S. 28ff aus dem Original) verstehen unter der „*Intrinsic Cognitive Load*“ die Menge an notwendigen Details, die verarbeitet werden müssen, um die Information des Elementes sinnvoll zu verarbeiten, zu vernetzen und im Langzeitgedächtnis abzulegen. Diese Art der kognitiven Belastung ergibt sich demnach aus der Komplexität des Lerngegenstands und dem individuellen Vorwissen der Schülerin oder des Schülers. Lehrkräfte müssen daher in der Lage sein, dieses Vorwissen bei der Unterrichtsplanung zu berücksichtigen, besonders dann, wenn multimediale Elemente in den Unterricht eingebaut werden sollen. Die *Intrinsic Cognitive Load* kann nur schwer reduziert werden, ohne dabei die Aufgabenstellung selbst stark zu verändern.

Der eigentliche Lernvorgang verursacht den sogenannten *Germane Cognitive Load*. Dabei ist ein erfolgreiches Lernen nur dann möglich, wenn *Extraneous* und *Intrinsic Cognitive Load* noch Kapazitäten für den *Germane Cognitive Load* frei lassen. Grundsätzlich ist, unter Berücksichtigung des *Intrinsic Cognitive Load* und *Extraneous Cognitive Load*, ein möglichst hoher *Germane Cognitive Load* für einen erfolgreichen Lernprozess wünschenswert (Paas & Sweller, 2014). Ist die Summe aus *Intrinsic* und *Extraneous Cognitive Load* hingegen größer als das Fassungsvermögen des Arbeitsgedächtnisses, kommt es zu einem *Cognitive Overload*, der sich nachteilig auf den Lernerfolg bzw. die Lernleistung auswirkt, da einzelne Elemente des Lerngegenstandes nicht verarbeitet werden können. Ziel muss es also sein, den *Extraneous Cognitive Load* möglichst weit zu reduzieren, damit eine höhere Kapazität im Arbeitsgedächtnis für den Lerngegenstand zur Bearbeitung zur Verfügung steht.

Sweller (2002) aber auch R. E. Mayer und Chandler (2001) sowie R. E. Mayer (2009) und R. Mayer (2014) beschreiben in ihren Ausführungen unterschiedliche Effekte, die unter anderem bei Multimediaanwendungen berücksichtigt werden müssen, damit der *Extraneous Cognitive Load* nicht zu hoch wird oder gar möglichst klein gehalten werden kann:

- Der *Split Attention Effect* besagt, dass die kognitive Belastung geringer ist, wenn die Aufmerksamkeit der Schüler nicht aufgeteilt wird. Konkret bedeutet dies, dass nötige Informationen an einem Ort (in einer Grafik oder in einem Text) konzentriert und nicht auf mehrere Orte (Grafik und Text) verteilt sind.

- Nach dem *Modality Effect* sinkt die kognitive Belastung beim Lernenden, wenn Bilder mit gesprochenem Text kombiniert werden. Was für den althergebrachten Unterricht selbstverständlich ist, stellt beim Lernen mit Multimediaanwendungen hingegen eine besondere Herausforderung dar.
- Nach dem *Redundancy Effect* belasten zusätzliche weiterführende Informationen, die mit dem eigentlichen Lerngegenstand nur am Rande etwas zu tun haben, das Arbeitsgedächtnis unnötig. Besonders bei Multimediaanwendungen muss dies berücksichtigt werden. Weiterführende Informationen können nach R. E. Mayer (2009) zwar in verschiedenen Situationen für verschiedene Schülergruppen sinnvoll sein, für das Gros der Schülerinnen und Schüler sind diese Angebote aber zu belastend. Deshalb bietet es sich an, diese zusätzlichen Informationen auszulagern und mittels Hyperlink darauf zu verweisen.
- Mit dem *Element Interactivity Effect* wird die hohe kognitive Belastung bei Inhalten beschrieben, die stark miteinander vernetzt sind und/oder aufeinander aufbauen. Bei Lerngegenständen oder Lerneinheiten, die isoliert zu verstehen sind, tritt dieser Effekt jedoch kaum auf. Die Konsequenz daraus ist, dass vor allem im Anfangsunterricht das *Single Concept Principle* angewendet wird. Dabei wird der Fokus auf einen Sachverhalt, einen Begriff oder ein physikalisches Konzept pro Lerneinheit ausgerichtet.
- Der *Imagination Effect* besagt, dass die ideale Präsentationsform eines Lerngegenstands entscheidend von den Vorerfahrungen der Lernenden abhängt. Besonders groß ist dieser Effekt in Bezug auf das visuelle Vorstellungsvermögen.

Neben diesen Effekten werden in der Literatur noch weitere, das Arbeitsgedächtnis beeinflussende Faktoren genannt. Nach Mandl und Friedrich (1997) stellen arbeitsorganisatorische Fragestellungen, wie die Einordnung neu erlangter Informationen oder gar das Auffinden von Suchorten für neue Informationen, eine enorme Belastung für das Arbeitsgedächtnis dar. Letzteres kann zwar auch ein Lernziel des Unterrichts sein, ist dies jedoch nicht beabsichtigt, sollte, wenn möglich, darauf verzichtet werden.

Lehrkräfte müssen daher, besonders bei der Integration multimedialer Inhalte in den Physikunterricht, in der Lage sein, die kognitive Belastung für die Schülerinnen und Schüler möglichst gering zu halten.

### 4.3.6 Multiple Repräsentationen

In der Physik wird in den wenigsten Fällen mit isolierten Repräsentationen gearbeitet. Vielmehr bedarf die Komplexität der betrachteten Phänomene häufig verschiedener Darstellungsformen, die miteinander in Verbindung gebracht und in den allermeisten Fällen auch gleichzeitig bearbeitet werden müssen, damit die jeweiligen Informationen miteinander kombiniert werden und in ein Gesamtbild eingehen. Die Repräsentationsform, die aus der Kombination verschiedener Repräsentationen zum gleichen Objekt entsteht, wird als **multiple Repräsentation** bezeichnet. Grundsätzlich können alle denkbaren Repräsentationen (sinnvoll) miteinander kombiniert werden, um eine multiple Repräsentation zu erhalten. Häufige Beispiele sind Realbilder und schematische Darstellungen (vgl. auch Richtberg, 2018; Thoms & Girwidz, 2017) oder Funktionen und Funktionsgraphen, Wertetabellen und ihre jeweilige graphische Darstellung.

Jong et al. (1998, S. 12) begründen die Notwendigkeit des Einsatzes von multiplen Repräsentationen im Physikunterricht wie folgt: *„specific information can best be conveyed in a specific representation, and that for a complete set of learning material, containing a variety of information, a combination of several representations is therefor necessary.“* Obwohl auch ein Buch mit Text eine multiple Repräsentation darstellt, wird wegen der in Abschnitt 4.3.3 vorgenommenen Einschränkung auf digitale multimediale Anwendungen im Folgenden nur dieser Aspekt näher betrachtet.

Besonders in der digitalen Umgebung, in der verschiedene Darstellungsformen flexibel und vielschichtig eingesetzt werden können, bieten multiple Repräsentationen nach Ainsworth (1999) ein besonderes Lernpotenzial. Ainsworth begründet dies damit, dass der Lernende zunächst jede einzelne Repräsentation interpretieren muss, bevor er anschließend etwaige Gemeinsamkeiten und/oder Unterschiede identifizieren kann, um schließlich die einzelnen Repräsentationen mental ineinander zu übersetzen und zu vernetzen. Damit können Zusammenhänge besser veranschaulicht und es kann eine zeitliche Entwicklung verdeutlicht werden (vgl. hierzu auch Rey, 2011; Rubitzko, 2008; van der Meij & Jong, 2006). Demnach kann aus Ainsworth (1999) gefolgert werden, dass die Arbeit mit multiplen Repräsentationen zu einer intensiven kognitiven Aktivität führen kann, wie sie in Abschnitt 4.3.3.2 exemplarisch dargestellt wurde, bevor der neue Lerngegenstand und etwaige Handlungen im Langzeitgedächtnis abgelegt werden können. Dieser intensive und aktive Verarbeitungsprozess bildet nach R. Mayer (2014) eine Voraussetzung für einen effizienten Lernvorgang und kann nach Wong et al. (2011) zu einer größeren Verarbeitungstiefe führen. Die erfolgreiche Handhabung multipler Repräsentationen ist nach Spiro und Jehng

(1990) zudem ein Merkmal von kognitiver Flexibilität und Expertise im jeweiligen Wissensbereich. Deshalb muss die Arbeit mit multiplen Repräsentationen im Unterricht gezielt geübt werden, damit die Lernenden überhaupt ein gewisses Expertenniveau erreichen können.

Durch diese, in Teilen auch beabsichtigte, intensive Belastung des Arbeitsgedächtnisses besteht, wie in Abschnitt 4.3.5 beschrieben, die Gefahr eines *Cognitive Overload*. Werden auch dynamische Repräsentationsformen wie Animationen oder Simulationen eingesetzt, ist die Gefahr hierfür besonders groß (Ainsworth & VanLabeke, 2004). Eine ungewollte und häufig übersehene Belastung des Arbeitsgedächtnisses kann zudem bei der Bearbeitung von Aufgaben auftreten, die multiple Repräsentationen zur Bearbeitung voraussetzen, wenn der Lernende selbstständig weitere Repräsentationen erstellen muss und so die ursprüngliche multiple Repräsentation erweitert (Ainsworth, 2014). Eine Lehrkraft, die multimediale Inhalte im Unterricht einsetzen möchte, muss daher neben dem Wissen über die potenziell lernfördernde Wirkung multipler Repräsentationen auch etwaige Gefahren des Einsatzes in ihrer Unterrichtsplanung berücksichtigen.

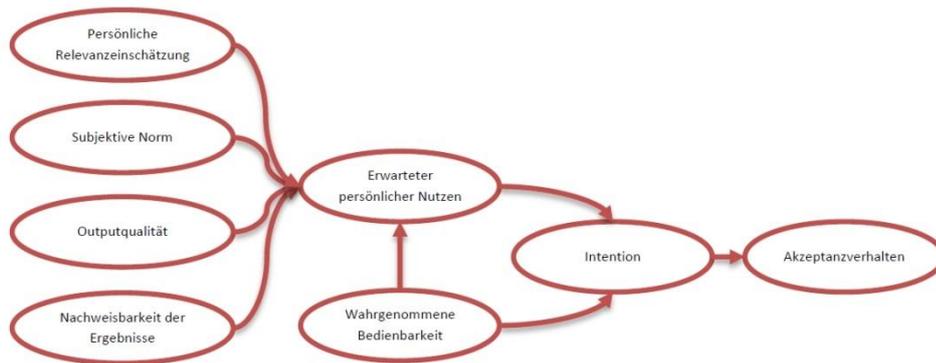
## **5. RELEVANTE KOMPONENTEN FÜR DAS KONZEPT EINER LEHRERFORTBILDUNG**

### 5.1 Integration des theoretischen Rahmens

Nach Idgatekiva und Lindner (2015) benötigen Lehrkräfte spezifische Aus- und Fortbildungsmaßnahmen, um Multimediainhalte zielgerichtet in den naturwissenschaftlichen Unterricht integrieren zu können. Dies begründen die Autoren unter anderem damit, dass 58 % der Lehrkräfte einen Mangel an Erfahrungen mit Multimedia als Grund für einen geringen Einsatz desselben im Unterricht angeben. Diese Studie lässt ferner den Schluss zu, dass Lehrkräfte Multimedia im Unterricht noch nicht vollumfänglich als mögliche Technologie akzeptieren.

In der vorliegenden Studie sollen daher schulspezifische Einflussfaktoren auf die Akzeptanz untersucht werden. Ferner gilt es, eine Möglichkeit aufzuzeigen, wie die Akzeptanz im Rahmen von Fortbildungsveranstaltungen gesteigert werden kann. Hierzu wurde in Unterkapitel 4.1.2 zunächst das Konstrukt der Akzeptanz diskutiert. Dabei wurde gezeigt, dass es wegen des sowohl wissenschaftlichen als auch außerwissenschaftlichen Gebrauchs des Akzeptanzbegriffs und angesichts der zahlreichen wissenschaftlichen Strömungen, in denen die Akzeptanz jeweils für sich untersucht wird, keine allgemeingültige Definition für dieses Konstrukt gibt. Für den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit wurde daher eine Definition gewählt, die sich an der aktuellen Akzeptanzforschung orientiert. Demnach ist die Akzeptanz durch die Aspekte der Einstellungs- sowie der Verhaltensakzeptanz bestimmt. Für die Untersuchung der Beziehungen zwischen den kognitiven Einflussfaktoren und dem Akzeptanzverhalten gilt das Technologieakzeptanzmodell von F. D. Davis (1986; F. D. Davis, 1989) als das am häufigsten verwendete und empirisch am besten bestätigte Modell. Daher soll es auch im Rahmen dieser Studie Anwendung finden.

In Abschnitt 4.1.5 wurde deshalb das UTAUT(=TAM2)-Modell (vgl. Abbildung 7) vorgestellt, das jedoch in seiner ursprünglichen Form nicht ohne weiteres auf den schulischen Kontext übertragbar ist. So ist die Outputqualität oder die Nachweisbarkeit der Ergebnisse zwar im Kontext eines Unternehmens sinnvoll, da hier statistische Größen wie der Unternehmensumsatz oder im Rahmen der Qualitätssicherung durchgeführte Kontrollen belastbare Daten liefern. Im schulischen Kontext sind derartige statistische Kennzahlen jedoch nicht gegeben bzw. können je nach betrachteter Schülergruppe teilweise erheblich variieren, sodass hier neben einzelnen Einflussfaktoren auch Wirkzusammenhänge neu bewertet werden müssen.



**Abbildung 7: Variante des UTAUT(TAM2)-Modells; Grundlage der Adaption (eigene Darstellung)**

### 5.1.1 Adaption des UTAUT-Modells

In dieser Arbeit wird deshalb vorgeschlagen, die beiden Einflussgrößen ‚Outputqualität‘ und ‚Nachweisbarkeit der Ergebnisse‘ für den Einsatz im Schulkontext zusammenzuführen und als von der Lehrkraft eingeschätzter Nutzen für die Schülerin oder den Schüler zu betrachten. Denn der eigentliche ‚Output‘ einer Schule ist der Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler sowie deren Vorbereitung auf das Leben nach der Schule. Als ‚Nachweisbarkeit der Ergebnisse‘ wiederum kann in diesem Sachzusammenhang beispielsweise das Abschneiden in Leistungserhebungen oder auch die persönliche Weiterentwicklung unabhängig von klassischen Zensuren betrachtet werden. Dies ist jedoch nicht problemlos möglich, da es in diesem Zusammenhang zahlreiche weitere Einflussfaktoren gibt, wie etwa die Tagesform, die emotionale Lage in Prüfungssituationen, die generelle Lernbereitschaft eines individuellen Schülers oder auch die Motivation respektive das Interesse eines Schülers, sich mit einem Fach oder einem Themengebiet zu beschäftigen, die die Ergebnisse der Leistungserhebungen positiv wie negativ beeinflussen können. Die Messung dieser Größen kann deshalb im schulischen, anders als im unternehmerischen Kontext, erhebliche Probleme bereiten. Jedoch gibt es in der Schule in jeder Klasse und jedem Fach eine Person, die nicht nur die pädagogische, sondern auch die fachliche Qualifikation besitzt, zu beurteilen, ob ein Schüler aus dem Einsatz einer bestimmten Methode einen Nutzen (z. B. in Form besserer Leistungen oder zusätzlicher Kompetenzen, die über das eigentliche Unterrichtsziel hinausgehen) ziehen kann oder nicht. Da dies jedoch nur eine subjektive Einschätzung der Lehrkraft darstellt, wird dieser Einflussfaktor als ‚erwarteter Nutzen für Schülerinnen und Schüler‘ bezeichnet.

Die Subjektive Norm kann nach B. Wu und Zhang (2014) bei den in dieser Studie betrachteten Multimediaanwendungen vernachlässigt werden, da diese keine komplexen Interaktionen zwischen den Schülern oder den Lehrkräften erwarten lässt. Jedoch sei angemerkt, dass dieser Einflussfaktor dann berücksichtigt werden muss, sobald es beispielsweise zu einem Materialaustausch zwischen den Lehrkräften einer Schule kommt, der allgemein verbindlich innerhalb der jeweiligen Fachschaft ist, wenn es also zu einer irgendwie gearteten Kooperation bei der Verwendung von Multimediaanwendungen kommt.

Abbildung 8 enthält das dieser Studie zu Grunde liegende Basismodell. Die Änderungen gegenüber dem UTAUT bzw. TAM2 sind hier blau hervorgehoben. Die Grundannahmen des ursprünglichen UTAUT-Modells, das eine gegenseitige Beeinflussung der Einflussfaktoren nicht erlaubt ist, gilt weiterhin. Auch eine Wirkung zwischen der ‚wahrgenommenen Bedienbarkeit‘ und den Einflussfaktoren ist zunächst nicht vorgesehen. In Teilstudie 1 (vgl. Abschnitt 6.1) wird die Validität dieses Modells ermittelt, indem verschiedene Modellparameter mit den entsprechenden Modellparametern des originalen UTAUT-Modells verglichen werden.

### 5.1.2 Erweiterung des Basismodells

Das TPACK-Framework hat die „[...] *theory, research, and practice in teacher education and teacher professional development*“ (M. J. Koehler et al., 2014, S. 101) stark beeinflusst. Dennoch finden sich in der aktuellen Literatur nur wenige Stellen, die auf einen Einfluss des TPACK auf die zugrunde liegende Akzeptanz von Technologien im Unterricht auf Seiten der Lehrkräfte hinweisen. In der Studie von Young et al. (2018) wurde beispielsweise herausgefunden, dass bei Lehramtsstudierenden das TPACK einen Einfluss auf den erwarteten Nutzen und die wahrgenommene Bedienbarkeit von Technologien hat. Hieran anknüpfend ist es von Interesse, ob dies auch für praktizierende Lehrkräfte gilt. Idcgatekiva und Lindner (2015) konnten belegen, dass Lehrkräfte die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten, die Multimedia im Unterricht bietet, nicht

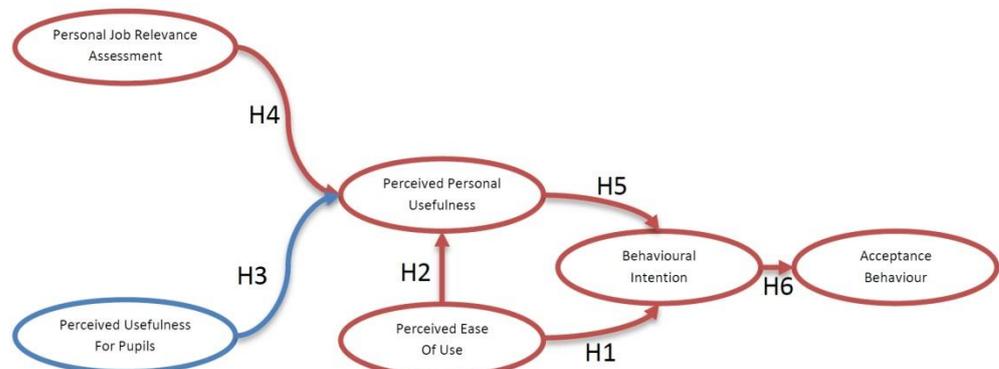


Abbildung 8: Adaptiertes Basismodell dieser Studie (eigene Darstellung)

voll ausschöpfen. Stattdessen verwenden Lehrkräfte weiterhin althergebrachte Präsentationsmethoden. Dies führen die Autoren unter anderem auf fehlendes Wissen über die Einsatzmöglichkeiten von Multimediaanwendungen im Unterricht sowie deren pädagogische und fachliche Wirkung auf einen individuellen Schüler zurück. Dieses Wissen entspricht genau dem Technological Pedagogical and Content Knowledge (TPACK). Wie oben bereits erläutert, ist die Akzeptanz neuer Technologien auf Seiten praktizierender Lehrkräfte ebenfalls eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass Technologien auch tatsächlich im Unterricht eingesetzt werden. Beides zusammen lässt eine Erweiterung des Technologieakzeptanzmodells um den Einflussfaktor TPACK zu.

Bei der Betrachtung des Akzeptanzverhaltens im Unterricht ist zu erwarten, dass anders als im Kontext Wirtschaft – aus dem das TAM2/UTAUT-Modell ursprünglich stammt – weitere komplexere Zusammenhänge zwischen dem Akzeptanzverhalten und dem technologiespezifischen sowie deren pädagogischem und inhaltlichem Wissen notwendig sein werden, damit Technologien erfolgreich im Unterricht eingesetzt werden zu können (vgl. hierzu Abschnitt 4.2.2).

Aus pädagogischer Sicht müssen Lehrkräfte beispielsweise unterschiedliche Schülerinnen und Schüler mit unterschiedlichen Voraussetzungen betreuen, weshalb es eines ausgeprägten Wissens nicht nur über die Wirkung von Multimedia in unterschiedlichen Unterrichtssituationen sowie zusätzlicher Fertigkeiten im Umgang mit dieser Technologie bedarf. Durch die Erweiterung des Basismodells um das TPACK ergeben sich zusätzliche mögliche Wirkzusammenhänge:

So soll in dieser Studie nicht nur überprüft werden, ob das TPACK einen Einfluss auf den ‚wahrgenommenen persönlichen Nutzen‘ von Multimediaanwendungen einer Lehrkraft hat, es gilt auch in Erfahrung zu bringen, ob es den von der Lehrkraft wahrgenommen Nutzen für Schülerinnen und Schüler beeinflusst.

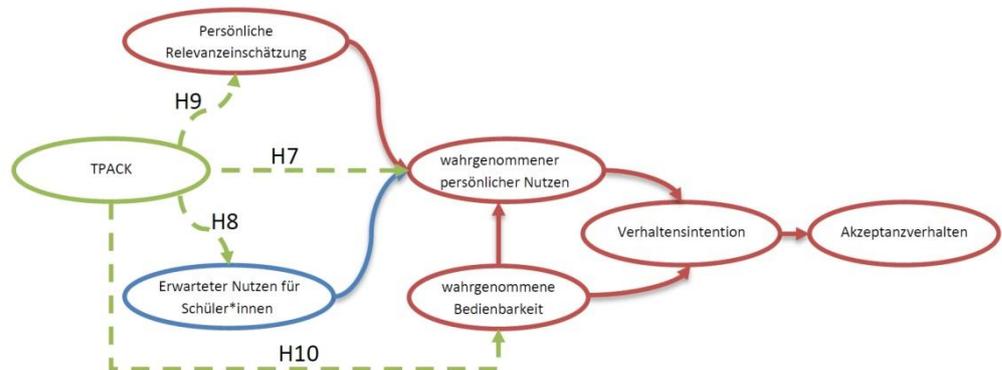
Obwohl dieser Wirkzusammenhang zunächst wegen der Einschränkung, dass es keine gegenseitige Beeinflussung der externen Variablen geben darf, als verboten anzusehen ist, erweist es sich im schulischen Kontext durchaus als sinnvoll, diesen Wirkzusammenhang zu erlauben. Denn das TPACK beschreibt das Wissen einer Lehrkraft, wie diese eine geeignete Technologie im Unterricht fachlich und pädagogisch passend einsetzt, weshalb davon auszugehen ist, dass durch dieses umfassende Wissen der von der Lehrkraft subjektiv eingeschätzte Nutzen einer Multimediaanwendung für Schülerinnen und Schüler beeinflusst wird. Denn eine Lehrkraft wird nichts im Unterricht einsetzen oder akzeptieren, wenn sie bezweifelt, dass der Schüler oder die Schülerin daraus einen Nutzen ziehen kann.

Gleiches gilt für die ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ einer Multimediaanwendung. Hat eine Lehrkraft einen hohen Score auf der TPACK-Skala, also insbesondere auch ein breites technologiespezifisches Wissen, wird erwartet, dass diese Lehrkraft die Bedienbarkeit einer Multimediaanwendung positiver einschätzt als eine Lehrkraft, die nur ein geringes Wissen über die Technologie und deren Einsatz im Unterricht besitzt.

Insgesamt ergibt sich so das in Abbildung 9 dargestellte erweiterte Technologieakzeptanzmodell, das in der Teilstudie 1 mit der Forschungsfrage 2 validiert wird. Darüber hinaus werden dessen Modellparameter mit den entsprechenden Modellparametern des originalen UTAUT-Modells verglichen.

### 5.1.3 Die Fortbildungsveranstaltung

Im theoretischen Teil wird den Lehrkräften aufgezeigt, wie digitale Angebote das Lehren und Lernen verändern können. Laut Kember (2008) ist es eine Notwendigkeit, den Unterricht in einer digitalen Welt so zu gestalten, dass er auf die Bedürfnisse heutiger und zukünftiger Schüler passend ausgerichtet ist. Daher wird im Workshop zunächst ein Augenmerk auf die kognitiven Prozesse gelegt, die beim Lernen mit digitalen Medien besonders relevant erscheinen. Hierzu liefert die in Abschnitt 4.3.4 vorgestellte Theorie zum multimedialen Lernen von



**Abbildung 9: Erweiterung des Basismodells dieser Studie um den Einflussfaktor TPACK (eigene Darstellung)**

R. E. Mayer (2009; R. Mayer, 2014) einen geeigneten und breit akzeptierten Anknüpfungspunkt. Im Workshop wird jedoch auch auf die Gefahr hingewiesen, dass durch unpassend gestaltete Multimediainhalte das Arbeitsgedächtnis, wie in Abschnitt 4.3.5 (Cognitive Load Theory) beschrieben, überlastet werden kann. Um diese Überlastung zu vermeiden, werden den Lehrkräften verschiedene Prinzipien zur Gestaltung multimedialer Inhalte nach dem Vorschlag von R. Mayer (2014) vorgestellt und anhand von Beispielen veranschaulicht. Hierbei wird in Anlehnung an Wang (2008) ebenfalls ein Rahmen vorgeschlagen, der nahe an der Unterrichtspraxis orientiert ist und mit dessen Hilfe Lehrkräfte multimediale Inhalte leichter schüler- und sachgerecht erstellen können.

An dieser Stelle wird auf eine detaillierte Beschreibung beider Fortbildungsteile in Abschnitt 5.2.1 verwiesen.

## **5.2 Workshop für und mit Lehrkräften**

### **5.2.1 Fortbildungskonzept**

Die Ergebnisse von Eickelmann, Gerick und Bos (Schwippert et al., 2014) deuten darauf hin, dass die Qualifizierung von Lehrkräften über Fortbildungen ein positiver Prädiktor für die Nutzung digitaler Medien im Unterricht ist. Dies bestätigt sich auch bei Sailer, Murböck und Fischer (Sailer et al., 2017). Sie befragten 410 Lehrkräfte zu ihrer Qualifikation hinsichtlich digitaler Medien und zum Einsatz digitaler Medien im Unterricht. Von den Befragten gaben 67 % an, dass Fortbildungen zu digitalen Medien dazu beitragen, diese sinnvoll in den Unterricht zu integrieren.

Davon abgesehen bilden technische Fertigkeiten und technologiebasiertes Wissen, wie es in Fortbildungen vermittelt wird, eine notwendige, aber keine hinreichende Voraussetzung für den Multimediaeinsatz im Unterricht. So sind nach Scheiter und Lachner (Scheiter & Lachner, 2019) auch affektive Größen hinsichtlich der Nützlichkeit digitaler Medien als Ziele der Lehrerbildung in den Blick zu nehmen. Mit dem hier vorgestellten Fortbildungskonzept sollen unterschiedliche Einflussfaktoren auf die Akzeptanz, die Physiklehrkräfte Multimediaanwendungen im Physikunterricht entgegenbringen, betrachtet werden. Zudem wird untersucht, wie sich eine Änderung des TPACK auf die Akzeptanz von Multimediaanwendungen im Physikunterricht auswirkt.

Im Folgenden werden zunächst die Struktur und die Inhalte der Fortbildungsveranstaltung beleuchtet. Im Anschluss wird das Tool PUMA@LMU vorgestellt, mit dessen Hilfe die Fortbildung und die Studie durchgeführt wurden. Abschließend wird ein exemplarisches Fortbildungsmodul erläutert, das im Rahmen dieser Arbeit entstanden ist und diverse theoretische Ansätze der

Fortbildung exemplarisch am Thema der Entfernungsbestimmung in der Astrophysik beschreibt.

### 5.2.2 Struktur einer zielgerichteten Fortbildungsveranstaltung

Das Wissen von Lehrkräften über Multimediaanwendungen ist divergent (Uzunboylu & Tuncay, 2010). Manche Lehrkräfte besitzen umfassendes Wissen über die Wirkung verschiedenster Unterrichtsszenarien, andere hingegen besitzen kaum oder kein Wissen über die Möglichkeiten, die digitale Anwendungen für den Lehr-Lern-Prozess bieten. Dies stellt ein nicht unerhebliches Problem bei der Gestaltung von Fortbildungen dar.

Gerick und Kollegen berichten zwar, dass zwei Drittel der Lehrkräfte in Deutschland in der Lage seien, Unterricht so vorzubereiten, dass Informationstechnologien zum Einsatz kommen. Damit liegen deutsche Lehrkräfte jedoch weit unterhalb des europäischen Durchschnitts (Gerick et al., 2014). Bei diesem Vergleich sollte gleichwohl bedacht werden, dass Gerick eher Selbstauskünfte der Lehrkräfte in Bezug auf den Einsatz von Informationstechnologien berücksichtigt.

Dennoch werden Informationstechnologien häufig nur einseitig zur Recherche eingesetzt (Scheiter & Lachner, 2019), was die hohe Zahl zusätzlich relativiert.

Aktuelle Weiterbildungsmaßnahmen fokussieren sich häufig auf die Vermittlung technologischer Kompetenzen und werden im Übrigen von weniger als einem Fünftel der Lehrkräfte genutzt (Gerick et al., 2014). Für die in dieser Studie angestrebte gezielte Förderung des TPACK reicht die Vermittlung von technologischem Wissen allein jedoch nicht aus. Vielmehr bedarf es auch der Vermittlung von Wissen, wie diese Technologien eingesetzt werden können, um konkrete fachliche Inhalte lernwirksam zu vermitteln.

Nach Desimone (Desimone, 2011, S. 69) sollten erfolgreiche Fort- und Weiterbildungsmaßnahmen in der Lehrerbildung deshalb einen inhaltlichen Fokus besitzen. *„Die Aktivitäten sollten sich auf die Vermittlung von Fachinhalten sowie auf die Frage, wie Schülerinnen und Schüler diese Inhalte lernen, konzentrieren“* (ebd.). Dieser Punkt schließt insbesondere auch innovative Lehrmethoden oder Aufgabentypen mit ein. Unter anderem beschreiben Kuhn und Kollegen (Kuhn, 2013; Kuhn et al., 2014; Kuhn & Vogt, 2012a, 2012b, 2012 ff, 2013) aber auch Bresges und Kollegen (Bresges et al., 2013; Bresges, 2018) zahlreiche innovative Möglichkeiten des Smartphone- und Tablet-Einsatzes im Physikunterricht. Sie beschränken sich dabei jedoch nicht nur auf deren technische Vorstellung, sondern beschreiben auch deren Auswirkungen auf den Lehr-Lern-Prozess und was Lehrkräfte bei einem Einsatz beachten sollten.

Ferner sollten Lehrkräfte aktiv in die Fort- und Weiterbildungsmaßnahme eingebunden werden, sodass beispielsweise ein individuelles Feedback zu selbst erstellten Inhalten möglich ist (Desimone, 2011, S. 69). Insbesondere ist hier ein Feedback aus lernpsychologischer und pädagogischer Sicht angedacht. Während der Fortbildung vermittelte Inhalte sollen zudem konsistent mit

*„ihrem Wissen und ihren Überzeugungen sowie mit bildungsadministrativen Rahmenbedingungen“*

sein (ebd., S. 69).

Zudem soll im Rahmen der Fortbildung nach Wilhelm (Wilhelm, 2007) aufgezeigt werden, wie eine zeitliche Integration des neu Erlernten in den gewohnten Unterricht stattfinden kann. Ideal ist es daher auch, eine gemeinsame Lerngruppe aus Gleichgesinnten, z. B. der Lehrkräfte der gleichen Fachschaft, zu schaffen, da hier eine dauerhafte gegenseitige Unterstützung möglich ist (Desimone, 2011, S. 69). Diesen Aspekt greift auch Wilhelm (Wilhelm, 2007) auf, der fordert, dass der Dozent für die Teilnehmerinnen und Teilnehmer auch über einen längeren Zeitraum nach der eigentlichen Fortbildung für etwaige Rückfragen zur Verfügung stehen sollte.

Dieser theoretische Rahmen für eine gewinnbringende Lehrerfortbildung bildet die Grundlage für das Konzept der Fortbildungsveranstaltung dieser Studie. Die konkreten Inhalte der Fortbildung werden in Abschnitt 5.2.3 näher erläutert.

Darüber hinaus werden implizit Aspekte angesprochen, die ebenfalls eine potenziell negative Auswirkung auf die Akzeptanz von Multimediainhalten im Physikunterricht besitzen: Denn Vogelsang und Kollegen (Vogelsang et al., 2019) stellen fest, dass schulische Lernerfahrungen wahrgenommene Hinderungsgründe, die gegen den Einsatz von Multimedia im Unterricht sprechen, reduzieren können. Deshalb werden die einzelnen Fortbildungen direkt in den Räumen der jeweiligen Schule durchgeführt. So ist beispielsweise sofort zu erkennen, dass mit der vorhandenen Ausstattung die vorgestellte Unterrichtssequenz durchgeführt werden kann. Etwaige Hinderungsgründe können damit unmittelbar widerlegt werden.

### **5.2.3 Ablauf des Workshops**

Die Fortbildungen samt Begleitstudien fanden zwischen dem 28.06.2017 und dem 14.11.2017 statt und umfassten jeweils drei Zeitstunden. Sie begannen stets mit einer kurzen Einführung, in der die Teilnehmer und Teilnehmerinnen allgemeine Informationen zur Fortbildung sowie zum Ablauf der Begleitstudie erhielten. Weiterhin wurde auf die Freiwilligkeit und Anonymität der Studie hingewiesen. Anschließend füllten die Teilnehmenden den 15-minütigen Prä-Test aus, mit

Fragen zum Akzeptanzverhalten von Multimediaanwendungen im Physikunterricht, zum TPACK und zum persönlichen Hintergrund.

Der Workshop schloss direkt an den Prä-Test an und war in zwei Lernphasen geteilt. Im ersten Teil hielt der Versuchsleiter einen einstündigen Vortrag über den theoretischen Hintergrund zu Multimediaanwendungen und deren Auswirkungen auf das Lernen (siehe Abschnitt 5.2.3.1). Die Teilnehmer erfuhren, welche Auswirkungen konkrete Anwendungsszenarien auf den Lernprozess haben und durch welche Maßnahmen sie eine zu große kognitive Belastung der Schülerinnen und Schüler vermeiden können. Anschließend folgte der zweite, anwendungsorientierte Teil (siehe Abschnitt 5.2.3.2), in dem die Teilnehmerinnen und Teilnehmer selbst in Einzelarbeit 90 Minuten lang verschiedene multimediale Inhalte unter Beachtung der zuvor behandelten Umsetzungsprinzipien erstellten. Hierzu stellte der Versuchsleiter einen USB-Stick mit allen Materialien (Texte, Bilder und URLs) zur Verfügung, mit denen die Teilnehmerinnen und Teilnehmer alle Folien des Beispielkurses (vgl. Unterkapitel 5.3.6) erstellen konnten. Da der zeitliche Umfang des Workshops auf drei Stunden beschränkt war, bestand nicht die Möglichkeit, alle Folien des Beispielkurses im Rahmen der Fortbildung zu erstellen. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer erhielten deshalb ein mehrseitiges Handout zum Selbststudium, auf dem neben einem Link zu den Materialien auch alle im Beispielkurs präsentierten Folien zur Verfügung gestellt wurden.

Unmittelbar im Anschluss an die beiden Lernphasen der Fortbildung fand der 15-minütige Post-Test mit Fragen zum Akzeptanzverhalten von Multimediaanwendungen im Physikunterricht und zum TPACK statt.

### **5.2.3.1 Theoretischer Teil des Workshops**

#### **5.2.3.1.1 Begriffsklärung**

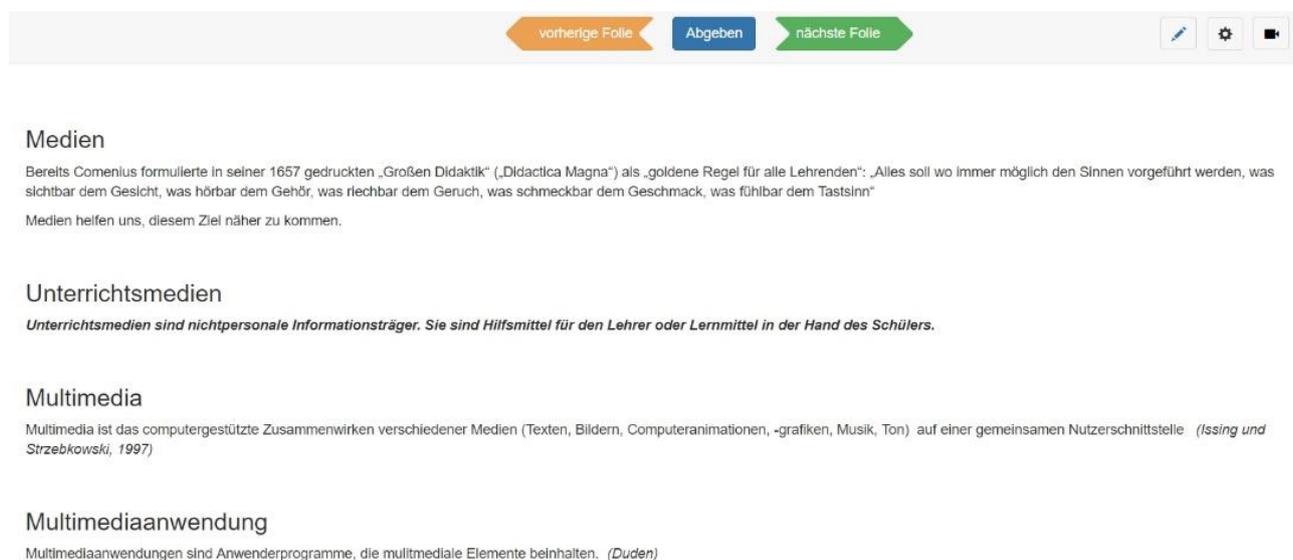
Zu Beginn des theoretischen Teils des Workshops steht eine kurze Begriffsklärung, was unter den Begriffen ‚Medien‘, ‚Unterrichtsmedien‘, ‚Multimedia‘ und ‚Multimediaanwendung‘ jeweils zu verstehen ist. Um Missverständnissen vorzubeugen, ist eine Begriffsklärung zu Beginn insofern für den Workshop essenziell, als den Lehrkräften damit im Folgenden eine klare Definition und Unterscheidung der verschiedenen Begriffe bekannt ist.

Der Wortursprung des Begriffs Medium (Singular) stammt aus dem Lateinischen und bedeutet übersetzt ‚Mitte‘, ‚Zentrum‘ bzw. ‚Öffentlichkeit‘. Damit ist wörtlich übersetzt ein Medium etwas, das in der Mitte liegt oder etwas, das vermittelt. Heute werden unter ‚Medien‘ im Allgemeinen alle Verfahren und Mittel verstanden, die zur Informationsverbreitung oder -vermittlung genutzt werden

können. Dazu gehört neben dem klassischen visuellen, auditiven und audiovisuellen Bereich seit dem Aufstieg moderner digitaler Technologien auch der interaktive Bereich, bei dem Medien ebenfalls zur schnellen (Chats, Instantnachrichten etc.) oder zur zeitversetzten Kommunikation (E-Mail etc.) verwendet werden. Diese im Vergleich zu Büchern neue Arten von Medien wird auch als ‚Neue Medien‘ bezeichnet. Eine einheitliche und trennscharfe Definition dieses Begriffs hat sich in der Didaktik bisher nicht durchgesetzt. Vorausgesetzt wird jedoch meist eine moderne Hardware, wie beispielsweise ein PC, Smartphone, Tablet-PC mit Internetzugang und/oder digitale Bild- und Tonmedien.

Medien können zudem unter drei Blickwinkeln betrachtet werden: dem technischen, dem semantischen und dem pragmatischen. Der technische Blickwinkel meint hier die Hard- und Software und beschreibt damit die Bedienung des Mediums. Beim semantischen Blickwinkel wird ein Augenmerk auf die Gestaltung der Inhalte sowie auf die Inhalte an sich gelegt, wobei auf den Ausbau des Verständnisses der Nutzer abgezielt oder dieses vorausgesetzt wird. Der pragmatische Blickwinkel umschließt alle Bereiche, die mit der Anwendung des Mediums und damit der Kommunikation in einem Zusammenhang stehen.

Der Begriff ‚Medien‘ wurde bereits sehr früh umschrieben; so formuliert Comenius in seiner 1657 gedruckten „Großen Didaktik“ („Didactica Magna“) als „goldene Regel für alle Lehrenden“: „Alles soll wo immer möglich den Sinnen vorgeführt werden, was sichtbar dem Gesicht, was hörbar dem Gehör, was riechbar dem Geruch, was schmeckbar dem Geschmack, was fühlbar dem Tastsinn.“ (Keller & Comenius, 1998, S. 136–137)



Navigation buttons: vorherige Folie, Abgeben, nächste Folie, and icons for search, settings, and refresh.

### Medien

Bereits Comenius formulierte in seiner 1657 gedruckten „Großen Didaktik“ („Didactica Magna“) als „goldene Regel für alle Lehrenden“: „Alles soll wo immer möglich den Sinnen vorgeführt werden, was sichtbar dem Gesicht, was hörbar dem Gehör, was riechbar dem Geruch, was schmeckbar dem Geschmack, was fühlbar dem Tastsinn“

Medien helfen uns, diesem Ziel näher zu kommen.

### Unterrichtsmedien

*Unterrichtsmedien sind nichtpersonale Informationsträger. Sie sind Hilfsmittel für den Lehrer oder Lernmittel in der Hand des Schülers.*

### Multimedia

Multimedia ist das computergestützte Zusammenwirken verschiedener Medien (Texten, Bildern, Computeranimationen, -grafiken, Musik, Ton) auf einer gemeinsamen Nutzerschnittstelle. (Issing und Strzebkowski, 1997)

### Multimediaanwendung

Multimediaanwendungen sind Anwenderprogramme, die multimediale Elemente beinhalten. (Duden)

**Abbildung 10: Folie zur Begriffsdefinition (eigene Darstellung; Screenshot aus PUMA@LMU)**

Mangels einheitlicher Definition des Begriffs ‚Unterrichtsmedien‘ wurde für diesen Workshop eine Definition gewählt, nach der Unterrichtsmedien im Gegensatz zu allgemeinen Medien den Zweck besitzen, Unterrichtsinhalte zu transportieren und für den Schüler zugänglich zu machen. Meyer und Junghans (2022, S. 150) definiert Unterrichtsmedien als „[...] ‚tiefgefrorene‘ Ziel-, Inhalts- und Methodenentscheidungen. Sie müssen im Unterricht durch das methodische Handeln von Lehrern und Schülern wieder ‚aufgetaut‘ werden“. Damit sind Unterrichtsmedien nichtpersonale Informationsträger und dienen als Hilfsmittel für den Lehrer oder als Lernmittel in der Hand des Schülers. Folglich richten sich Unterrichtsmedien an einen kleinen Empfängerkreis und werden von der Lehrkraft gezielt für einen bestimmten, definierten Zweck eingesetzt.

Präziser als die Bezeichnung der Neuen Medien lässt sich der Begriff ‚Multimedia‘ fassen. Nach Issing und Strzebkowski (1997) ist darunter die computerunterstützte Integration verschiedener Medien auf einer gemeinsamen Nutzerschnittstelle zu verstehen. Heute geht diese computerunterstützte Integration häufig mit einer onlinebasierten Unterstützung einher.

Werden verschiedene Multimediainhalte beispielsweise mit Hilfe einer Software miteinander in Verbindung gebracht, wird von Multimediaanwendungen gesprochen. In der vorliegenden Arbeit werden diese als Programme bzw. Autorensysteme aufgefasst, die es ermöglichen, verschiedene multimediale Inhalte online zu erstellen, zu bearbeiten, zu kombinieren und plattformübergreifend darzubieten. Beispiele für Multimediaanwendungen sind Plattformen wie Moodle, Mebis oder das in diesem Workshop verwendete PUMA@LMU.

### **5.2.3.1.2 Multiple Repräsentationen und Cognitive Load**

Die Lehrkräfte erhalten eine anschaulich präsentierte Kurzzusammenfassung des Abschnitts 4.3.3 dieser Arbeit. Dabei wird zunächst erläutert, dass multimedial präsentierte Inhalte wesentliche pädagogische Vorteile gegenüber herkömmlichen Medien besitzen, da sich ein Lerngegenstand leichter mit unterschiedlichen Darstellungsformen veranschaulichen lässt (Multicodierung), oder dass sie die Möglichkeit haben, durch den kombinierten Einsatz von Bild und Ton verschiedene Sinneskanäle anzusprechen (Multimodalität). Zudem können multimedial dargestellte Lerngegenstände interaktive Komponenten aufweisen, die den Lernenden aktiv an den Wahrnehmungs-, Erlebnis- und Lernprozessen teilnehmen lassen. All dies verstärkt die Motivation sowie die emotionale Anteilnahme an Handlungen und hat einen positiven Einfluss auf die Vernetzung des Lerngegenstandes. Daraus resultiert ferner ein positiver Einfluss auf die Verarbeitungstiefe und es wird flexibles Wissen generiert (Kircher et al., 2015).

Angesichts dieser Vorteile (vgl. dazu auch Abschnitt 4.3.3), die multimedial präsentierten Inhalte für die Schülerinnen und Schüler bieten, könnte eine oberflächliche Betrachtung der Zusammenhänge den Schluss nahelegen, alle Demoexperimente aus dem Schulunterricht zu verbannen und stattdessen durch Simulationen zu ersetzen. Dies hätte zudem eine massive Kosteneinsparung zur Folge und würde die landläufige Meinung, wonach Experimente allzu selten funktionieren, endgültig falsifizieren.

Doch dieser Zusammenhang bedarf einer vielschichtigen Betrachtung. Beispielsweise wurde als ein großer Vorteil multimedialer Inhalte bereits die Möglichkeit angesprochen, dass durch das Ansprechen verschiedener Sinneskanäle eine größere Verarbeitungstiefe erreicht werden kann. Genau hier liegt aber auch ihre Grenze. Der Mensch besitzt nicht nur lediglich zwei Sinneskanäle (hören und sehen), sondern auch noch einen Tastsinn, einen Geschmackssinn und einen Geruchssinn. Keiner dieser Sinne kann – mit der gegenwärtigen Technik – durch eine computergestützte Simulation oder Animation angesprochen werden.

Idealerweise sollten jedoch alle Sinne gleichermaßen angesprochen werden, um die bestmögliche Verarbeitungstiefe zu erhalten. Daher kann ein multimedial präsentiertes Experiment ein Realexperiment nicht ersetzen, sondern bestenfalls ergänzen.

Simulationen und Animationen können jedoch ein Experiment veranschaulichen, bei dem Phänomene wegen beispielsweise einer zu geringen Größe der Bestandteile (z. B. Kernspaltung, radioaktiver Zerfall etc.) nicht direkt sichtbar wären.

Für eine ausgewogene und für eine Lehrkraft nützliche Betrachtung ist es notwendig, die Grenzen von multimedial präsentierten Inhalten zu umreißen. Dies geschah mit Mayers Kognitiver Theorie des Multimedia-Lernens, in der zunächst geklärt wurde, wie das Arbeitsgedächtnis arbeitet, und dass dasselbe nur einen begrenzten Umfang an parallelen Verarbeitungsschritten ausführen kann. Mit jeder neuen Darstellungsform und jeder Verknüpfung zwischen diesen oder zwischen Vorwissen und neuen Darstellungsformen steigt die kognitive Belastung eines Schülers an. Wird diese zu hoch, verfallen Informationen, ohne

vorherige Folie   Abgeben   nächste Folie

[Pencil] [Settings] [Close]

### Multiple Repräsentationen

#### Gründe für den Einsatz

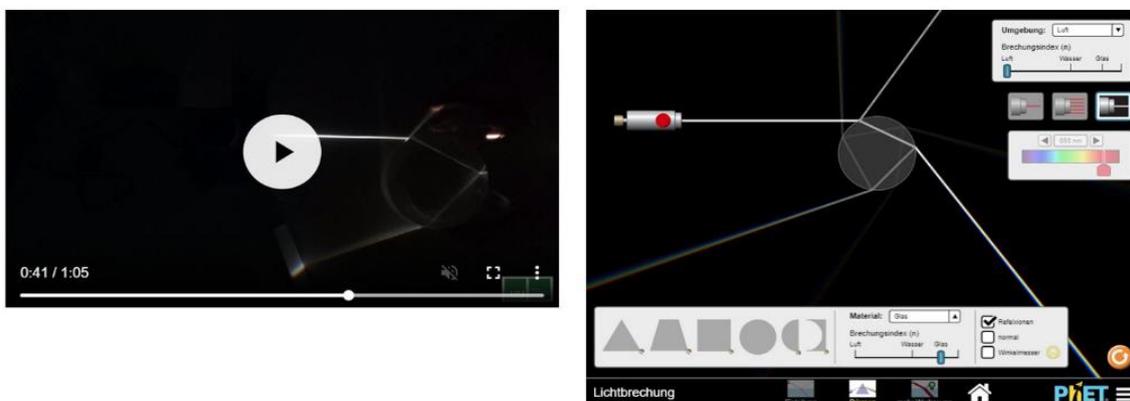
- Spezifische Informationen können am besten in spezifischen Darstellungen übermittelt werden.
- Unterschiedliche, vielfältig verfügbare Repräsentationen bedeuten flexibles Wissen
- verschiedene Darstellungsformen können zu unterschiedlichen Wissensstrukturen mit spezifischen Nutzungseigenschaften führen
- Spezifische Repräsentationsformen erleichtern bestimmte Lernformen
- Es existieren physiologische Beweise für eine unterschiedliche Verarbeitung von Text und Bild (Untersuchungen von Gehirnhemisphären)

#### Funktionen multipler Repräsentationen

- Verschiedene Repräsentationen können sich ergänzen.
- Die Verknüpfung verschiedener Darstellungen kann helfen, unbekannte Repräsentationen zu interpretieren und zu verstehen.
- Für ein tieferes Verstehen können Abstraktionen, Erweiterungen oder die Darstellung von Relationen zweckmäßig sein.

#### Beispiel (reine Textaufgaben vs. Kombinationen aus Text und Bild)

- Werden in Übungsphasen neben textlastigen Aufgaben auch Aufgaben verwendet, die vor allem eine Arbeit mit Bildern, Graphen und Diagrammen erfordern, dann ist der Lernerfolg größer.
- Bei Aufgaben und Bildern ergeben sich in Tests (und auch im realen Leben) dann bessere Ergebnisse.



**Abbildung 11: Multiple Repräsentationen im Physikunterricht am Beispiel Brechung an einem Grenzübergang optisch dünn zu dicht und optisch dicht zu dünn. ( Screenshot links: Matthias Schweinberger (2017); Screenshot rechts: Rouinfar et al. (2004-2016)**

dass diese zuvor verarbeitet wurden. Dies ist sowohl mit als auch ohne den Einsatz von Multimedia unbedingt zu vermeiden.

Grundsätzlich besteht bei der Lehre mit Multimedia jedoch eher die Tendenz zu einer hohen kognitiven Auslastung, da selbst der Umgang einer Schülerin oder eines Schülers mit einem Tablet oder PC, der nicht seiner oder ihrer Gewohnheit entspricht, eine nicht zu unterschätzende kognitive Belastung bedeutet. Ebenso können variierte Farben oder ungewöhnliche Bedienelemente eine zusätzliche kognitive Belastung bedeuten.

### 5.2.3.1.3 Prinzipien zur multimedialen Gestaltung

Damit Lehrkräfte die kognitive Belastung für ihre Schülerinnen und Schüler möglichst geringhalten können, wurden verschiedene Prinzipien der multimedialen Gestaltung nach Mayer (vgl. Abschnitt 4.3.3) an Beispielen vorgestellt und erläutert, weshalb der Lernvorgang bei einer Beachtung der jeweiligen Prinzipien vorteilhafter verläuft. Vorgestellt wurden das

Multimediaprinzip, das Kontiguitätsprinzip, das Redundanzprinzip, das Personalisierungsprinzip sowie das Segmentierungsprinzip.

### *5.2.3.1.3.1 Das Multimediaprinzip*

Das Multimediaprinzip weist nach Butcher (2014) ursprünglich darauf hin, dass das Lernen mit einer Kombination von Wörtern und Bildern effektiver ist als das Lernen mit Wörtern allein. Heute wird es jedoch breiter gefasst und bezieht sich auf das Lernen mit verschiedenen Repräsentationsformen, bei denen der Inhalt visuell und verbal aufgearbeitet ist. Das Multimediaprinzip liefert einen Hinweis auf das optimale Design von multimedial gestalteten Lernmaterialien sowie die Art und Weise, wie Lernstrategien und Lernprozesse mit Multimedia kombiniert werden können, um bestimmte Ziele zu erreichen. Multimedial präsentierte Inhalte, die nach dem Multimediaprinzip konzipiert wurden, zeigen in Studien zur Ausbildung von Ärzten im Vergleich zu herkömmlichen Materialien einen wesentlich größeren Effekt bei der Verarbeitungstiefe und bei der Erlangung von Langzeitwissen (vgl. z. B.: Issa et al., 2011 ). Es lässt sich jedoch eine Abhängigkeit der Gestaltung der Lernmaterialien vom Vorwissen der Schülerinnen und Schüler beobachten, die von Lehrkräften bei der Erstellung von multimedial gestalteten Inhalten beachtet werden sollte. Für Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen sollten visuelle Repräsentationen bei ikonischen Darstellungen auf ihre wesentlichen Komponenten reduziert werden (z. B. Butcher, 2006). Verbale Informationen sollten zudem in den visuellen Inhalt integriert werden, wenn sie dem Lernenden präsentiert werden (z. B. Chandler & Sweller, 1991; R. E. Mayer, 1989). Die in beiden Teilen des Workshops verwendete Multimediaanwendung PUMA@LMU bietet hierfür die Möglichkeit, auf einfache Weise Hover-Elemente in Bildern einzufügen, die eine Beschreibung einer Grafik mit kurzen, prägnanten Texten ermöglicht. Diese visuellen Hinweise stellen einen großen Vorteil für den Lernprozess dar, da hierdurch eine sinnvolle Verarbeitung kritischer Elemente erreicht wird (vgl. Boucheix & Guignard, 2005).

Soll das Lehrmaterial visuelle Inhalte enthalten, die auf verschiedene Arten dargestellt werden können, ist es für Lehrkräfte ratsam, den Lernenden eine Wahl zu ermöglichen, nach der jede Schülerin und jeder Schüler für sich entscheiden kann, ob konkrete oder abstraktere Repräsentationen entweder sequenziell (z. B. Goldstone & Son, 2005) oder gleichzeitig (z. B. Moreno et al., 2011) angezeigt werden sollen. Durch die Aufteilung des Inhalts auf mehrere Folien kann mit PUMA@LMU jede dieser Möglichkeiten umgesetzt werden.

Ist bei der Betrachtung eines physikalischen Inhalts eine Bewegung ein wesentlicher Aspekt des zu lernenden Inhalts, so sollte neben statischen Bildern auf Animationen, Simulationen und Videos zurückgegriffen werden (Höffler & Leutner, 2007). Idealerweise werden diese dann mit inhaltlichen und erklärenden Aspekten kombiniert. Auch hier bietet PUMA@LMU den Lehrkräften die Möglichkeit, Animationen, Simulationen und Videos mit Texten und Bildern oder beispielsweise mit Multiple-Choice-Fragen zu kombinieren. Zudem besteht die Möglichkeit, Aufgaben zu erstellen, bei denen Prozessschritte in die korrekte Reihenfolge gebracht werden müssen. Ferner sollte die Lehrkraft darauf achten, dass alle wesentlichen Aspekte auf dem ersten Bildschirm zu sehen sind und dass das Scrollen auf ein Minimum reduziert wird. Dadurch wird eine unnötige kognitive Belastung vermieden, die durch ein häufiges Suchen von zusammengehörigen Inhalten auf weiter voneinander entfernten Teilen der gleichen Seite entstehen kann.

vorherige Folie
Abgeben
nächste Folie

### Das Multimediaprinzip (Mayer, R.E., 1997, 2005)

stellt heraus, dass die Kombination von Text und Grafik für den Lernerfolg der Lernenden besser ist als der Text oder die Grafik alleine. (multiple Repräsentationen)  
*"Students learn better from words and pictures than from words alone."* (Mayer, 2001, S. 83).

*"However, simply adding pictures to words does not guarantee an improvement in learning - that is, all multimedia presentations are not equally effective."* (Mayer, 2005, S. 31)

#### Umsetzungsprinzipien

- Inhalte mit kurzen Texten
- Grafiken mit Popups oder Hover-Elementen
- Scrollen soll auf ein Minimum reduziert sein
- Grafiken werden durch Popups/Hover-Elemente gut veranschaulicht.
- Erläuternde Texte sind knapp und prägnant gehalten.

#### Beispiel

	klassisch	relativistisch	Übungen
Aufbau			
Funktion			
Simulation			
Beschleunigung			
Flugphase			

**Der Aufbau einer Elektronenkanone:**  
Informieren Sie sich über die Funktion der Bauteile durch klicken/touchen auf die Beschriftungen.

Glühwendel Die Anode wird durch die Beschleunigungsspannung positiv geladen. Sie zieht dann die Elektronen aus der Elektronenwolke um die Glühwendel an.  
 Heizspannung (0 - 6,3 V~)  
 Wehneltzylinder  
 Anode  
 Elektronenstrahl  
 Beschleunigungsspannung  $U_b$  (100 - 5000 V)  
 evakuierter Glaskolben

Abbildung 12: Multimediaprinzip zur lernwirksamen Gestaltung multimedialer Lernumgebungen mit Beispielanwendung von Richtberg (2018)

vorherige Folie
Abgeben
nächste Folie

✎
⚙️
📺

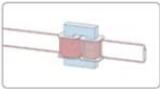
## Kontiguitätsprinzip (Mayer, R.E., 1997, 2005)

Das Kontiguitätsprinzip besagt, dass zwei Ereignisse assoziiert werden, wenn sie wiederholt zeitlich oder räumlich gemeinsam auftreten.

### Umsetzungsprinzipien

- Popups mit räumlicher Nähe zum zu erklärenden Objekt
- Natürlich verlinkten Inhalt nicht trennen
- Rückkopplung auf die Frage beibehalten.
- Dem Lernenden soll die (gesprochene) Erklärung zu einer Animation zeitgleich und nicht nachfolgend zur Verfügung stehen

### Animationen zum Transformator

	<p><b>Anwendung</b></p> <p>Animation zur Anwendung eines Transformators</p>
	<p><b>Aufbau</b></p> <p>Animation zum Aufbau eines Transformators</p>
	<p><b>Funktionsweise</b></p> <p>Animation zur Funktionsweise eines idealen Transformators</p>

**Abbildung 13: Das Kontiguitätsprinzip zur gleichzeitigen Präsentation von Bild- und Audioinhalten (Lächele, 2013)**

#### 5.2.3.1.3.2 Das Kontiguitätsprinzip

Das Kontiguitätsprinzip ist das Prinzip der räumlichen Nähe und der simultanen Darstellung. Es sagt aus, dass die räumlich benachbarten Darstellungen textuell und bildhaft codierter Informationen den Wissenserwerb mehr fördern als eine getrennte Präsentation von Texten und Bildern. Dies wird weiter verstärkt, indem auch auditiv codierte Informationen simultan zum gerade betrachteten Objekt angezeigt werden. Demnach sollen Informationen unabhängig davon, wie sie codiert sind, immer in räumlicher und zeitlicher Nähe zueinander auftreten. Daraus ergeben sich wiederum verschiedene Umsetzungsprinzipien, die bei der Gestaltung multimedialer Inhalte beachtet werden sollten. Die im vorherigen Abschnitt erwähnten Hover-Elemente sollen an der Stelle erscheinen, an der sich auch das gerade betrachtete Objekt befindet. Ein größerer Versatz muss unbedingt vermieden werden, um die kognitive Belastung zu reduzieren. Werden auditiv codierte Informationen angeboten, sollen diese, wie im in Abbildung 13 angedeuteten Beispiel, in einer zeitlichen Nähe zu dem Ereignis auftreten, das damit beschrieben werden soll. Während einer Lerneinheit soll stets eine Rückkopplung zur ursprünglichen Fragestellung ersichtlich sein, sodass Abschweifungen vermieden werden. Zusätzliche Informationen können jedoch mit Links/Modal-Boxen oder Ähnlichem in die Präsentation integriert werden.

Dadurch entsteht ein weiterer Mehrwert für die Schülerinnen und Schüler, da sie einerseits eine übersichtliche Präsentation, andererseits aber auch die Möglichkeit haben, an passende weiterführende Informationen zu gelangen, ohne lange danach suchen zu müssen.

### 5.2.3.1.3.3 *Das Redundanzprinzip*

Redundante Informationen sollen vermieden werden, denn die Koordinierung redundanter Informationen führt zu einer höheren kognitiven Belastung.

Nach Kalyuga und Sweller (2014) besagt das Redundanzprinzip, dass redundante Inhalte das Lernen eher stören als erleichtern. Redundanz tritt auf, wenn die gleichen Informationen gleichzeitig in mehreren Formen dargestellt werden. Dies bedeutet, dass negative Effekte auftreten, wenn beispielsweise Texte sowohl in auditiver als auch in visueller Form, Messwerte graphisch und tabellarisch oder Grafiken und deren exakte optische Beschreibung zusätzlich in Textform vorliegen. Dies widerspricht häufig den intuitiven Erwartungen der Lehrkräfte, kann allerdings mit Hilfe der Theorie der kognitiven Belastung erklärt werden. Dabei erhöht die Koordinierung redundanter Informationen mit wesentlichen Informationen die Auslastung des Arbeitsgedächtnisses, wodurch das Lernen beeinträchtigt werden kann. Durch das Beseitigen solcher redundanter Informationen entfällt die Notwendigkeit, mehrere Informationsquellen zu koordinieren, wodurch sich die unnötige Belastung des Arbeitsgedächtnisses reduziert.



## Redundanzprinzip (Mayer, R.E., 1997, 2005)

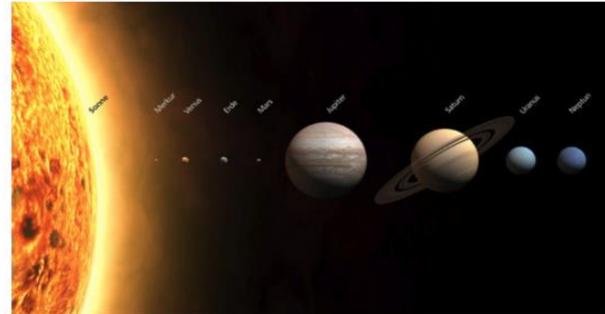
Das Redundanzprinzip beschreibt eine Lerneinrichtung durch Redundanzen in multiplen Informationsquellen wie etwa Texten und Bildern (Mayer, 2009, 2005, 1997).

### Umsetzungsprinzipien

- Informationen sollen sich nicht wiederholen
- Grafikbeschriftungen anstelle von langen Texten verwenden
- Rückkopplung auf die Fragestellung beibehalten.

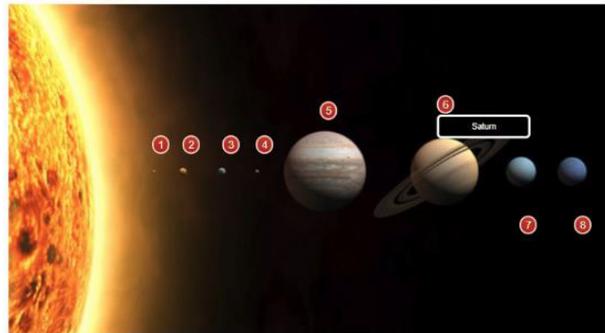
## Negativ-Beispiel

Die Sonne steht im Zentrum unseres Sonnensystems. Als erster Planet bewegt sich Merkur um die Sonne. Als zweiter Planet Venus, als dritter die Erde und als vierter Planet Mars. Im Anschluss folgen die viel größeren Planeten Jupiter, Saturn Uranus und Neptun.



Quelle: [https://www.dlr.de/ner/desktopdefault.aspx/tabid-6481/10677\\_read-24099/](https://www.dlr.de/ner/desktopdefault.aspx/tabid-6481/10677_read-24099/)

## Positiv-Beispiel



**Abbildung 14: Das Redundanzprinzip – Negativ- und Positiv-Beispiele. Hover-Elemente mit Hinweistexten erstellt mit PUMA@LMU (Originalbild oben: DLR (2010); selbst bearbeitete Version unten)**

**Personalisierungsprinzip** (Mayer, R. E., 1997, 2005)

- Personalisierung verstärkt das Interesse des Lernenden.
- Ein verstärktes Interesse führt zu einem größeren Lernengagement, was wiederum einer erhöhten Verarbeitungstiefe führt.
- Alles zusammen manifestiert sich schließlich in einer besseren Transferleistung.
- Besonders groß ist der positive Effekt bei Schülerinnen und Schülern mit einem geringem Vorwissen.
- Unterschiede im Alter sind hingegen nicht signifikant.

**Umsetzungsprinzipien**

- Verwenden der ersten und zweiten Person
- Texte als Konversationen formulieren

**Beispiel - Entstehung eines Blitzes**  
(Mayer, R. E. 2014)

**Berücksichtigung des Personalisierungsprinzips**  
Lass mich dir erzählen, wie sich ein Blitz bildet. Angenommen, du stehst draußen und die warmen Strahlen der Sonne, heizen um dich herum die Erde auf. Kühle feuchte Luft bewegt sich über eine wärmere Oberfläche und wird dabei erwärmt. Die erwärmte feuchte Luft steigt nun schnell auf. Wenn sich die Luft in diesem Aufwind abkühlt, kondensiert der Wasserdampf in Wassertropfen und bildet eine Wolke. Glückwunsch! Du warst gerade bei der Geburt deiner eigenen Wolke dabei.

**Ohne Personalisierungsprinzip**  
Kühle feuchte Luft bewegt sich über eine wärmere Oberfläche und wird dabei erwärmt. Die erwärmte feuchte Luft steigt nun schnell auf. Wenn sich die Luft in diesem Aufwind abkühlt, kondensiert der Wasserdampf in Wassertropfen und bildet eine Wolke.

**Abbildung 15: Das Personalisierungsprinzip**

### 5.2.3.1.3.4 Das Personalisierungsprinzip

Durch das Personalisierungsprinzip sollen individuelle Unterschiede der Schülerinnen und Schüler beispielsweise durch eine persönliche und individuelle Ansprache ausgeglichen werden. Neben dieser sind auch individuelle Aufgaben, die für die jeweiligen Schwächen der Schülerinnen und Schüler optimiert sind, über dieses Prinzip genauso abgedeckt wie die Herstellung eines persönlichen Bezugs zur gerade betrachteten Problemstellung, indem beispielsweise ein Alltagsbezug hergestellt wird.

R. Mayer (2014) konnte im Rahmen eines Vergleichs personalisierter Texte mit nichtpersonalisierten Texten nachweisen, dass durch die Personalisierung das Interesse der Lernenden verstärkt wird, was zu einem größeren Lernengagement und schließlich zu einer erhöhten Verarbeitungstiefe führt. Alles zusammen manifestiert sich schließlich in einer besseren Transferleistung. Besonders groß ist dabei der positive Effekt bei Schülerinnen und Schülern mit geringem Vorwissen. Unterschiede, die auf das Alter der Lernenden zurückgeführt werden können, sind hingegen nicht signifikant.

Personalisierte Texte stärken das Interesse der Lernenden und führen zu einer größeren Verarbeitungstiefe und einer besseren Transferleistung.

Personalisierung kann Lernzielen des Lehrplans widersprechen.

Lehrkräfte können zur Umsetzung dieses Prinzips beispielsweise zum Einstieg in ein neues Themengebiet Texte verwenden, die in der ersten oder zweiten Person verfasst sind. Zudem bietet es sich an, Texte als Konversation zwischen zwei oder mehreren Personen darzustellen. Dieses Vorgehen stellt jedoch auch ein Problem dar, da vor allem eine personalisierte Schreibweise von Texten den Zielen des Fachunterrichts in der Schule widerspricht. Denn im Fachprofil der Physik heißt es im bayerischen Lehrplan für Gymnasien, dass Schülerinnen und Schüler die „Fachterminologie“ kennen und damit arbeiten müssen und auch den Umgang mit „Fachtexten zur Physik“ lernen sollen. Dies schränkt die Verwendung personalisierter Texte im Wesentlichen auf den Einstieg in einen Themenbereich ein.

## Segmentierungsprinzip (Mayer, R.E., 1997, 2009)

Als Segmentierungsprinzip bezeichnet man die lernförderliche Wirkung durch die Präsentation multimedialer Botschaften in Form von lerngerechten Abschnitten im Vergleich zur Darbietung als durchgängige Einheit.

- Durch die Aufteilung in kleinere Sinnzusammenhänge kommt es zu einer Reduktion der kognitiven Last
- Unterschiedliche Lerngeschwindigkeiten müssen berücksichtigt werden.
  - Interessierte und schnellere Schüler benötigen weiterführende Links und Literaturhinweise.
- Es bedarf dazu allerdings auch einer angemessenen didaktischen Reduktion bei komplexen Inhalten.
  - Damit kommt es zu einer Zielgruppenabhängigkeit.



**Abbildung 16: Das Segmentierungsprinzip zur Aufteilung eines großen, übergeordneten Zusammenhanges in kleine, weitgehend abgeschlossene Sinnzusammenhänge (eigene Animation nach GSR, o.D.)**

### 5.2.3.1.3.5 Das Segmentierungsprinzip

Das Segmentierungsprinzip besagt nach van Merriënboer und Kester (2014), dass sich die Aufteilung einer dynamischen Visualisierung, wie beispielsweise Animationen oder Videos, in sinnvolle Teile oder Segmente positiv auf das Lernen und das Transferwissen auswirkt. Denn sowohl die Pausen, die durch die Segmentierung entstehen, als auch die besser überschaubaren Lerninhalte, die sich aus den gebildeten sinnvollen Segmenten ergeben können, deuten auf die positiven Auswirkungen der Segmentierung hin (Spanjers et al., 2012).

Möchten Lehrkräfte beispielsweise Videos einsetzen, so folgt aus dem Segmentierungsprinzip, dass den Schülern nicht das gesamte Video mit allen Fragen oder Aufgaben auf einmal angezeigt werden sollte, sondern jeweils ein Teil des Videos, der sich mit einem konkreten Teilaspekt beschäftigt, sowie den dazu passenden Aufgaben. PUMA@LMU bietet hier beispielsweise die Möglichkeit, die Zeitmarken zu definieren, zwischen denen ein YouTube-Video abgespielt werden soll.

Außerdem wird durch die Segmentierung eines komplexen Inhaltes die kognitive Belastung reduziert, die durch die dynamische Visualisierung während des Lernprozesses hervorgerufen wird. Die Segmentierung ist dabei besonders für Lernende mit geringen Vorkenntnissen wirksam (z. B. Khacharem, Spanjers, Zoudji, Kalyuga & Ripoll, 2012; Spanjers, Wouters, van Gog & van Merriënboer, 2011). Mit der Segmentierung geht häufig auch eine didaktische Reduktion des Lerninhalts einher, wodurch naturgemäß eine Zielgruppenabhängigkeit entsteht. Eine Folge ist demnach auch, dass Schülerinnen und Schüler Aufgaben unterschiedlich schnell bearbeiten. Deshalb sollte eine Lehrkraft weiterführende

Die Aufteilung einer dynamischen Visualisierung in mehrere Teile hat positive Auswirkungen auf die Transferleistung und reduziert die kognitive Belastung.

Lehrkräfte können verschiedene Teile eines Videos zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit verschiedenen Aufgaben einbinden.



**Abbildung 17: „Media Include“ zum schnellen und einfachen Einbinden von Bildern und Simulationen (eigene Darstellung mit Screenshot von Wikipedia)**

Informationen verlinken oder weitere, vertiefende oder vernetzende Aufgaben anbieten, um die Unterschiede auszugleichen.

### 5.2.3.2 Praxisteil des Workshops – Anwendung von PUMA@LMU

Im Anschluss an die theoretischen Überlegungen zum Lernen mit Multimedia registrierten sich die Teilnehmer im PUMA@LMU-System und erstellten zusammen mit dem Versuchsleiter einen neuen Kurs, in dem sie im Anschluss ihre ersten Folien entwarfen.

Nach der Erstellung des Kurses erhielten die Teilnehmer jedoch zunächst eine Einführung in die grundlegende Funktionalität, die mit einem Kurs einhergeht. Neben dem selbsterklärenden Löschen des Kurses können die Lehrkräfte den Kurs mit der eigenen Fachschaft oder mit der gesamten Community teilen, indem sie die Option ‚Teilen‘ auswählen. Die Lehrkräfte im jeweiligen Adressatenkreis können anschließend den Kurs kopieren und ihre jeweilige Kopie bearbeiten. Zudem erfahren die Teilnehmer, wie sie den Kurs per Link zugänglich machen können, sodass der Kurs beispielsweise als Grundwissenskatalog auf der eigenen Schulwebseite eingebunden werden kann. Während der Erstellung der ersten Folie erläutert der Versuchsleiter das Grunddesign und das Bausteinsystem, das jeder Folie zu Grunde liegt. An dieser Stelle wird zur detaillierten Beschreibung dieser Grundlagen auf Unterkapitel 5.3.4 verwiesen, in dem alle Möglichkeiten exakt beschrieben sind.

Folie Nummer 1 sollte im zweiseitigen Design angezeigt werden und in jeder Spalte einen Text bzw. ein Bild beinhalten. Dazu wurde zunächst in beiden Spalten der Schnellbaustein ‚Freitext‘ ausgewählt und in die erste Spalte ein Text über die Kepler-Gesetze eingefügt. In die zweite Spalte wurden dann die zugehörigen Bilder durch Drag & Drop vom USB-Stick eingefügt. Der USB-Stick wurde den Teilnehmerinnen und Teilnehmern vom Versuchsleiter vorab zur Verfügung gestellt. Er enthielt alle Materialien (Texte und Bilder), die zum Erstellen der Folien

benötigt wurden. Im Anschluss wurde die Folie gespeichert und in der Vorschau betrachtet. Zu beachten ist hier, dass im Text auch Formeln mittels LATEX-Code eingegeben werden können. Falls eine Lehrkraft keinen LATEX Code erstellen kann, steht zudem ein übersichtlicher WYSIWYG-Editor zur Formeleingabe zur Verfügung.

Mit der zweiten Folie wurde die Möglichkeit demonstriert, wie mittels der eigens entwickelten Funktion ‚Media Include‘ innerhalb von Sekunden Bilder und Simulationen von anderen Webseiten eingebunden werden können. Beispielsweise wurde damit ein Bild von Johannes Kepler ohne komplizierten Down- und Upload von Wikipedia in die Folie eingebunden.

Mit den ersten beiden Folien sollte demonstriert werden, wie einfach es sein kann, eigene Inhalte zu erstellen und für Schülerinnen und Schüler zugänglich zu machen. Auch sollte damit eine anfängliche Skepsis abgebaut werden.

Auf der nächsten Folie wurde ein Beispiel zum Baustein ‚YouTube-Video‘ dargestellt. Der Versuchsleiter ließ die Teilnehmer hierzu ein beliebiges YouTube-Video suchen und im Browser betrachten. Benötigt wurde nun lediglich die URL, unter der das Video zu finden ist. Diese URL wurde in den Baustein einkopiert. Als nächstes konnten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer noch einstellen, ab welcher Zeitmarke das Video abgespielt werden sollte. Auch ein vorzeitiges Ende lässt sich so in den ‚Erweiterten Einstellungen‘ des Bausteins konfigurieren. Damit können den Schülerinnen und Schülern auch nur Ausschnitte von Videos zur Betrachtung vorgesetzt werden. Zusammen mit den Teilnehmerinnen und Teilnehmern wurden im Anschluss verschiedene Szenarien diskutiert, in denen ein YouTube-Video eingesetzt werden kann. Als ein beliebtes Szenario stellte sich hier die Möglichkeit heraus, fehlerhafte Videos als Hausaufgabe von den Schülerinnen und Schülern korrigieren zu lassen. Denn diese wiederholen das Gelernte auf diese Weise nicht nur, sondern wenden es auch konkret an. Hierzu bietet es sich an, das YouTube-Video mit dem Baustein ‚Eingabefeld für Schüler‘ zu kombinieren. Die Lehrkraft erhält dann eine übersichtliche Aufstellung aller abgegebenen Lösungen. Dieses Beispiel stellt zudem einen positiven Beitrag zur

Entscheide jeweils, ob die Aussage wahr oder falsch ist - nachdem du dich mit der Simulation beschäftigt hast!

Energieverlust ist in unserem Alltag immer wieder ein Thema. Auch der Skater bleibt ja irgendwann stehen.	<input type="radio"/> stimmt nicht
Energie kann von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden und auch auf einen anderen Körper übertragen werden.	<input type="radio"/> stimmt nicht
Die Gesamtenergie in einem abgeschlossenen System bleibt zu jeder Zeit gleich.	<input type="radio"/> stimmt nicht

**Abbildung 18: Multiple-Choice-Arbeitsaufträge zur Verifizierung von Aussagen (eigene Darstellung)**

Medienerziehung der Schülerinnen und Schüler dar, da diese damit lernen, dass Inhalte, die im Internet zu finden sind, häufig nicht unreflektiert betrachtet und verwendet werden sollten.

In der vierten Folie erstellten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer zusammen mit dem Versuchsleiter eine Multiple-Choice-Abfrage und kombinierten diese mit einer Simulation des Hebelgesetzes. Jedes Item des Multiple-Choice-Blocks stellt dabei eine eigene kleine Aufgabenstellung in Form einer zu überprüfenden Aussage dar. Die Aufgabe der Schülerinnen und Schüler ist es nun, jede Aufgabenstellung mit Hilfe der Simulation zu bearbeiten und zu verifizieren. Nach dem Klick auf ‚Abgeben‘ erhalten die Schülerinnen und Schüler ein Sofortfeedback mit der korrekten Antwort und, falls von der Lehrkraft eingegeben, auch eine Begründung, weshalb die Aussage richtig oder falsch ist. Als mögliche Einsatzszenarien wurden zusammen mit den Teilnehmerinnen und Teilnehmern Leistungsüberprüfungen am Ende einer Lerneinheit, die Erarbeitung neuer Zusammenhänge oder auch die Wiederholung früherer Lerngegenstände erarbeitet.

Mit der letzten Folie binden die Teilnehmerinnen und Teilnehmer herkömmliche PowerPoint-Präsentationen inklusive Animationen in eine Folie ein. Dazu wird die PowerPoint-Präsentation zunächst in den Online-Speicher ‚OneDrive‘ von Microsoft geladen und es wird ein ‚Einbetten‘-Link generiert. Diese URL wird schließlich in den Baustein ‚Webseite einbinden‘ kopiert. Nach dem Speichern können die Schüler mit der PowerPoint-Präsentation interagieren. Die PowerPoint-Präsentationen können nun mit unterschiedlichen anderen Bausteinen kombiniert werden, sodass unterschiedliche Einsatzszenarien möglich sind, die mit den Lehrkräften diskutiert wurden.

### 5.3 PUMA@LMU

Um konfundierte Variablen wie beispielsweise negative Erfahrungen mit den gängigen Lernmanagementsystemen wie Moodle oder der bayerischen Moodle-Fork mebis-Lernplattform zu vermeiden, wurde für die Fortbildung ein plattformübergreifendes, onlinebasiertes Autorensystem entwickelt (PUMA@LMU: Physik-Unterricht-Multimedia-Assistent@LMU, frei erhältlich unter <https://github.com/PM84/puma>), das auch die Erhebung empirischer Daten durch die Bereitstellung der Fragebögen ermöglicht.

Die Funktionen von PUMA@LMU sind mit gängigen Lernmanagementsystemen vergleichbar.

- Beispielsweise können multimediale Inhalte für Schülerinnen und Schüler individualisiert aufbereitet und zur Verfügung gestellt werden.

- So bietet PUMA@LMU zahlreiche abwechslungsreiche Aufgabentypen, die eine Lehrkraft einfach und schnell in ihren Unterrichtsgang integrieren kann.
- Zudem ermöglicht PUMA@LMU den Lehrkräften, auf multimediale Inhalte wie Animationen und Simulationen zuzugreifen, die unter anderem vom Lehrstuhl für Didaktik der Physik der LMU erarbeitet wurden und bereits vorab implementiert sind.
- Zudem bietet PUMA@LMU die Möglichkeit, dass Schülerinnen und Schüler selbstständig ‚stumme Experimentiervideos‘ vertonen, um ihre Fachsprache zu entwickeln (siehe Schweinberger et al., 2017; Schweinberger & Girwitz, 2017, 2021). Anschließend können sowohl Lehrkräfte als auch Peergroups mit PUMA@LMU die vertonten Videos mit einer individuellen Bewertung versehen (siehe Abbildung 3).

Aus didaktischer Sicht bieten die zahlreichen, teilweise innovativen Aufgabentypen in PUMA@LMU mehrere Vorteile, sowohl in der Lehrerausbildung als auch im klassischen Schulunterricht. Diese Aufgabentypen regen zu einer intensiven Auseinandersetzung mit dem Inhalt an. Eine derartig intensive Beschäftigung wie beim Vertonen stummer Videos (vgl. Unterkapitel 5.3.2) bildet nach Mayer (2014) eine Voraussetzung für einen effizienten Lernvorgang und kann nach Wong et al. (2011) zu einer größeren Verarbeitungstiefe und nach Nussbaum, Alcoholado und Büchi (2015) durch die interaktive und offene Lernform zu einem besonders effektiven Lernprozess beitragen.

### 5.3.1 Videoanalysen in der Lehrerausbildung

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes ‚Lehre@LMU‘ sollen unter anderem unterschiedliche Maßnahmen zur Verbesserung der Lehramtsausbildung erarbeitet werden. Am Lehrstuhl für Didaktik der Physik stellt die Videoanalyse von Experimentpräsentationen im Seminar eine geeignete Maßnahme dar. Die aufgezeichneten Videos werden vom Dozenten mit Hilfe gedruckter Analysebögen ausgewertet. Das daraus resultierende Feedback wird schließlich an die Studierenden zurückgeleitet. Die ursprünglich gewählte Vorgehensweise der Aufzeichnung mit einer Videokamera, der Codierung der Videos in ein webfähiges Format, des Feedbacks und der Distribution des Videos samt Feedback stellte sich als zeitaufwändig und stark fehleranfällig heraus. Als Konsequenz daraus wurde eine Webanwendung erstellt, die einen individuellen und geschützten Zugriff des Dozenten und der Studierenden auf das Video der Präsentation erlaubt. Der Dozent sollte zudem die Möglichkeit erhalten, die Analyse des Videos ebenfalls mit dieser Webanwendung durchzuführen, sodass der Feedbackprozess insgesamt, von der Analyse bis zur anschließenden

Bereitstellung, deutlich vereinfacht wird und auf einer gemeinsamen Plattform stattfinden kann. Eine Weiterentwicklung der Webapplikation konnte im Sommer 2017 erfolgen, als der WebRTC-Standard in allen gängigen Betriebssystemen und Browsern vollumfänglich integriert war. Dieser Standard erlaubt es Webanwendungen, auf Systemressourcen wie das Mikrofon und die Kamera zuzugreifen. Dadurch wurde die Möglichkeit geschaffen, die Videos mit Hilfe eines beliebigen Endgerätes direkt in der Webapplikation aufzuzeichnen und so unmittelbar den Feedbackprozess zu starten. Diese Weiterentwicklung zog eine spürbare Reduktion des Arbeitsaufwandes auf Seiten des Dozenten nach sich.

Die Videoaufzeichnungen sollen dabei nicht nur während der Präsentationen in den herkömmlichen Experimentierseminaren erfolgen, sondern auch im Rahmen von Schülerbesuchen. Letztere fanden in den Jahren vor der Corona-Pandemie während der Seminarzeiten statt und ermöglichen es den Studierenden, ihre Experimente vor Kleingruppen von drei bis fünf Schülern zu präsentieren. Derartige Schülerbesuche finden ein bis zwei Mal pro Semester statt und bieten den Studierenden damit bereits frühzeitig die Möglichkeit, mit Schülerinnen und Schüler in Kontakt zu treten und erste Lehrerfahrungen zu sammeln. Durch die Kleingruppenstruktur haben die Studierenden zudem die Möglichkeit, jedes Experiment mehrfach zu präsentieren und so ihr individuelles Vorgehen zu optimieren. Hierzu erhalten sie auch während des Schülerbesuchs Rückmeldung vom Dozenten.

So wie Schülerbesuche für die Studierenden eine abwechslungsreiche Lerngelegenheit bieten, so stellt die Organisation der Schülerbesuche für den Dozenten eine Herausforderung dar. Am Lehrstuhl finden im Laufe eines Semesters teils mehr als acht Schülerbesuche statt. Um den organisatorischen Aufwand zu reduzieren, wurde die obige Webanwendung um ein Buchungsmodul erweitert, mit dessen Hilfe Lehrkräfte Besuchstermine buchen können und daraufhin vollautomatisch die Kontaktdaten des Dozenten der jeweils zugeordneten Seminarveranstaltung erhalten.

### **5.3.2 Vertonung von Stummfilmen in der Lehrerausbildung**

Ein weiteres Projekt am Lehrstuhl für Didaktik der Physik der LMU wird in Zusammenarbeit mit dem Münchner Zentrum für Lehrerbildung (MZL) durchgeführt. Mit dem Projekt ‚Lehrerbildung@LMU‘ soll ebenfalls die Lehramtsausbildung an der LMU verbessert werden. Am Lehrstuhl für Didaktik der Physik richtet sich das Interesse unter anderem auf die Förderung der Kommunikationskompetenz der Studierenden. Die Studierenden sollen Stummfilme von Experimentpräsentationen, die am Lehrstuhl angefertigt wurden, nachträglich vertonen. In der ursprünglichen Vorgehensweise zur

Durchführung dieser Aufgabe mussten die Studierenden das entsprechende Video von der Webseite des Lehrstuhls für Didaktik der Physik der LMU downloaden, eine Audiospur aufzeichnen und beispielsweise mit Hilfe des Windows Movie Makers eine vertonte Version des Videos erstellen. Dieses Video war dann per E-Mail zurück an den Dozenten zu schicken, der die Analyse der Vertonung durchführte und den Studierenden ein Feedback in schriftlicher Form zukommen ließ. Diese Vorgehensweise war für den breiten Einsatz ebenfalls nicht praktikabel, da die Studierenden zunächst eine Einführung in den Windows Movie Maker oder bei anderen Betriebssystemen in ein ähnliches Programm benötigten. Zudem erzeugt die Rücksendung des Videos einen hohen Datenverkehr (Traffic), da für jedes Video eine große Datenmenge verschoben werden muss. Deshalb erschien es sinnvoll, die Webapplikation aus Unterkapitel 5.3.1 um ein weiteres Modul zu ergänzen und analog zur Videoanalyse zumindest die Rücksendung, die Analyse und das Feedback online abzuwickeln. Im Zuge der Einführung neuer Webstandards erhielten Browser nach und nach die Möglichkeit, mittels WebRTC auf das Mikrofon des Endgerätes, auf dem die Webapplikation ausgeführt wird, zuzugreifen. Als Safari als letzter weit verbreiteter Browser im Sommer 2017 ebenfalls WebRTC unterstützte, wurde diese innovative Neuerung bei der Weiterentwicklung dieses zusätzlichen Moduls aufgegriffen, sodass schließlich sogar die Vertonung des Videos online durchgeführt werden konnte. Der konkrete Ablauf einer Aufgabe zur Vertonung von Experimentiervideos ist in Unterkapitel 5.3.4 beschrieben.

### **5.3.3 Neue Möglichkeiten der Kompetenzförderung an Schulen**

Jenseits des universitären Kosmos werden auch in der Schulbildung neue Wege eingeschlagen. Durch die Einführung neuer kompetenzorientierter Lehrpläne im gesamten Bundesgebiet sollen die unterschiedlichen Kompetenzbereiche der Schülerinnen und Schüler gefördert werden. Neben dem Fachwissen beinhaltet dies insbesondere die Medien- und Kommunikationskompetenz der Schülerinnen und Schüler. Für die Förderung der Kommunikationskompetenz existieren neben dem schriftlichen Ausdruck, dem Unterrichtsgespräch sowie der Möglichkeit der Präsentation von Referaten nur wenige Aufgabenformate, die gezielt auf diesen Kompetenzbereich wirken könnten. Als eine einfache und zugleich innovative Möglichkeit bietet sich hierfür auch die Vertonung von Experimentiervideos an. Damit auch Lehrkräfte dieses innovative Instrument nutzen können, wurde die in den Unterkapiteln 5.3.1 und 5.3.2 beschriebene Webapplikation zu PUMA@LMU weiterentwickelt.

Damit PUMA@LMU auch an Schulen gewinnbringend eingesetzt werden kann, reicht der eben beschriebene Funktionsumfang jedoch nicht aus. Deshalb wurde PUMA@LMU für dieses Dissertationsprojekt um weitere Module ergänzt, die

teilweise auch bereits in anderen Autorensystemen enthalten und für ein sinnvolles Einsatzszenario unbedingt nötig sind. Beispielsweise sollen die Lehrkräfte auch bloße Textfolien mit Formeln, Bildern und Grafiken erstellen und als Teil ihrer Unterrichtspräsentation anbieten können. Andererseits werden auch Elemente integriert, für die zuvor verschiedene spezielle Plattformen nötig waren. Beispielsweise bietet PUMA@LMU die Möglichkeit von Abstimmungen, WordClouds, Multiple-Choice-Fragen mit integrierter Korrekturfunktion sowie Aufgaben zur Ordnung von Aussagen und ermöglicht das Einbinden von YouTube-Videos, LearningApps, herkömmlichen PowerPoint-Präsentationen und Geogebra-Applikationen. Trotz des dadurch stark gestiegenen Funktionsumfangs war es ein zentrales Anliegen, dass die Bedienung einfach, schnell und intuitiv erfolgen kann. Aus diesem Grund orientiert sich die Anordnung von Inhalten innerhalb von PUMA@LMU weitgehend an der bekannten Organisation von Folien in PowerPoint-Präsentationen. Deshalb wird im Folgenden auch die Analogie zu PowerPoint hervorgehoben.

Jede Lehrkraft kann beliebig viele Kurse erstellen, die in der Analogie PowerPoint-Dateien entsprechen. Jeder Kurs kann wiederum beliebig viele Folien beinhalten, die in der Analogie zur PowerPoint-Präsentation ebenfalls den Folien aus PowerPoint entsprechen. Für die einzelnen Folien gibt es verschiedene Grundfunktionen, die vom Aufgabentyp abhängen. Eine Folie des Aufgabentyps ‚Vertonung von Experimentiervideos‘ hat demnach einen anderen Funktionsumfang als eine Folie, die eine Videoanalyse ermöglichen oder einen Fließtext präsentieren soll. Die einzelnen Folientypen werden in der Anleitung von PUMA@LMU im Anhang detailliert beschrieben.

PUMA@LMU wurde auf diversen Lehrerfortbildungen vorgestellt. Dies führte dazu, dass Teile der Software (z. B. die Art der Bereitstellung von YouTube-Videos) bereits in die bayerische mebis-Lernplattform übernommen wurden oder sich, wie die im Folgenden beschriebene Funktion der Videovertonung, aktuell im Integrationsprozess in ebendieser Lernplattform befinden.

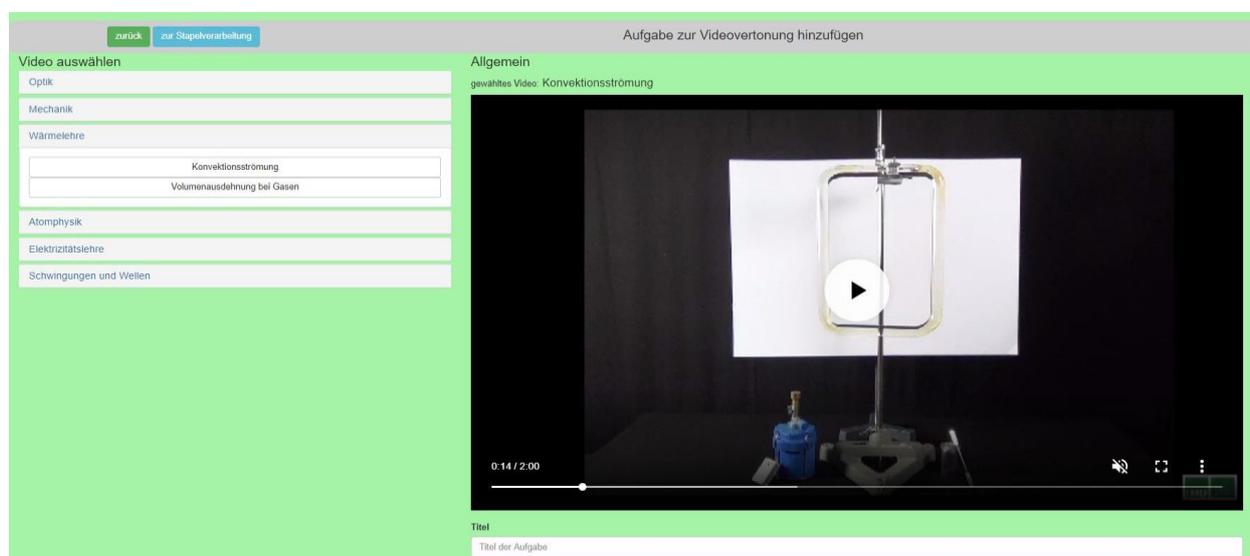
### 5.3.4 Videovertonung und -analyse im Schulunterricht

Als Folge des unerwartet schlechten Abschneidens deutscher Schülerinnen und Schüler bei der PISA-Vergleichsstudie Anfang der 2000er Jahre wurden in Deutschland Bildungsstandards eingeführt, die einen verbindlichen Rahmen vorgeben, was Schülerinnen und Schüler am Ende der zehnten Jahrgangsstufe mindestens erlernt haben sollen. Für das Fach Physik wurden diese 2004 im Rahmen der Kultusministerkonferenz (KMK) verabschiedet (KMK, 2004). Darin wird unter anderem die Kommunikationskompetenz von Schülerinnen und Schülern als eines der wesentlichen Unterrichtsziele festgelegt. PUMA@LMU ermöglicht einen innovativen Ansatz zur Förderung der Kommunikationskompetenz der Studierenden, aber auch der Schülerinnen und Schüler.

Der Lehrer oder die Lehrerin erstellt eine Folie zur Vertonung von Experimentvideos in drei Schritten:

1. Er wählt aus der themensortierten Liste ein Video eines Experiments aus,
2. er vergibt einen Titel für die Folie und
3. er verfasst den Aufgabentext für die Studierenden oder die Schülerinnen und Schüler.

Als optionalen vierten Schritt kann der Dozent auch noch einen Hinweis einblenden, der den Lernenden dabei helfen soll, die Aufgabe zielführend und gewinnbringend zu bearbeiten. Dieser Hinweis wird den Studierenden bzw. den Schülerinnen und Schülern in Form einer Modalbox angezeigt, wenn sie die



**Abbildung 19:** Erstellen einer Videovertonungsfolie in drei Schritten: Video auswählen, Titel vergeben und Aufgabentext verfassen (Videoquelle: Schweinberger et al., 2017; Schweinberger & Girwidz, 2017, 2021)

### Wie bearbeite ich diese Aufgabe?



Mit dieser und ähnlicher Aufgaben sollen Sie lernen, wie Sie sich möglichst gut in der Physik ausdrücken können.

Da dies nicht ganz leicht ist, finden Sie im Folgenden ein paar Hinweise zur Bearbeitung dieser Aufgabe:

1. Es wird Ihnen ein Video angezeigt. Schauen Sie sich das Video zunächst (gerne auch mehrfach) an, um einen Überblick zu bekommen.
2. Schauen Sie sich das Video erneut an und machen Sie sich Notizen, wann was zu sehen ist.
3. Klicken Sie auf "Aufnahme starten" und sprechen Sie in Ihr Mikrofon.
4. Hören und sehen Sie sich Ihre Aufnahme an und machen Sie sich Notizen, wo Sie etwas verbessern möchten/können.
5. Nehmen Sie eine weitere Version Ihrer Beschreibung auf und hören Sie diese nochmal zur Probe an.
6. Sie können beliebig viele Versionen aufzeichnen, so lange, bis Sie denken, dass alles in Ordnung ist.

#### Allgemeine Hinweise

- Falls Sie während der Bearbeitung eine Pause machen möchten, ist dies ohne Weiteres möglich. Ihre bisherigen Aufnahmen werden automatisch gespeichert.
- **Am Ende müssen Sie eine Version Ihrer Aufnahme abgeben, indem Sie auf den entsprechenden Button klicken, erst dann können Sie ein Feedback erhalten.**
- Die Bearbeitung kann sowohl mit Windows, Apple oder Android-Geräten auf den jeweiligen stationären oder mobilen Endgeräten erfolgen. Einzige Voraussetzung ist ein aktueller Browser, der nicht älter als September 2017 ist.
- Auf iOS (Apple) Geräten ist zudem mindestens iOS11 notwendig.

Jetzt beginnen

**Abbildung 20: Modalbox mit individualisierbaren Bearbeitungshinweisen (eigene Darstellung)**

Aufgabe öffnen. Ein Beispiel für die Gestaltung des Hinweises ist in Abbildung 20 dargestellt.

Zusätzlich kann der Dozent auswählen, wer auf diese Folie Zugriff haben soll. Zur Auswahl stehen hier die Optionen ‚Für alle Teilnehmer‘, ‚Für alle Teilnehmer bis auf Auswahl‘ oder ‚Für einen oder mehrere einzelne Teilnehmer‘. Mit diesen Auswahloptionen können einfach und schnell Aufgaben zur individuellen Förderung von Studierenden oder Schülerinnen und Schülern erstellt werden.

Nach dem Speichern können die Lernenden auf das Video zugreifen und mit dem Webinterface, das in Abbildung 21 zu sehen ist, eine Vertonung durchführen.

Nach der Vertonung des Videos erhält die Lehrkraft eine Auflistung aller abgegebenen Vertonungen (vgl. Abbildung 22) und kann damit alle Feedbacks abarbeiten.

Durch die bloße Beschäftigung mit dem Video und dessen Vertonung, auch ohne das Feedback des Dozenten, werden die Teilnehmer dazu animiert, sich intensiv mit der korrekten sprachlichen Umsetzung zu beschäftigen. Diese intensive Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand unterstützt PUMA@LMU mit der Möglichkeit, dass die Teilnehmer mehrere Aufnahmen erstellen und diese jeder Zeit anhören können, sodass sich die Teilnehmer Schritt für Schritt selbst verbessern. Wie in Abschnitt 4.3.4 und 4.3.6 gezeigt, bildet eine derartige intensive Beschäftigung nach R. Mayer (2014) eine Voraussetzung für einen effizienten Lernvorgang und kann nach Wong et al. (2011) zu einer größeren Verarbeitungstiefe und somit nach Nussbaum et al. (2015) durch die damit verbundene Interaktivität und die offene Form des Lernszenarios zu einem besonders effektiven Lernvorgang führen.

### Atwoodsche Fallmaschine

Im nachfolgenden Video ist eine Atwoodsche Fallmaschine zu sehen.

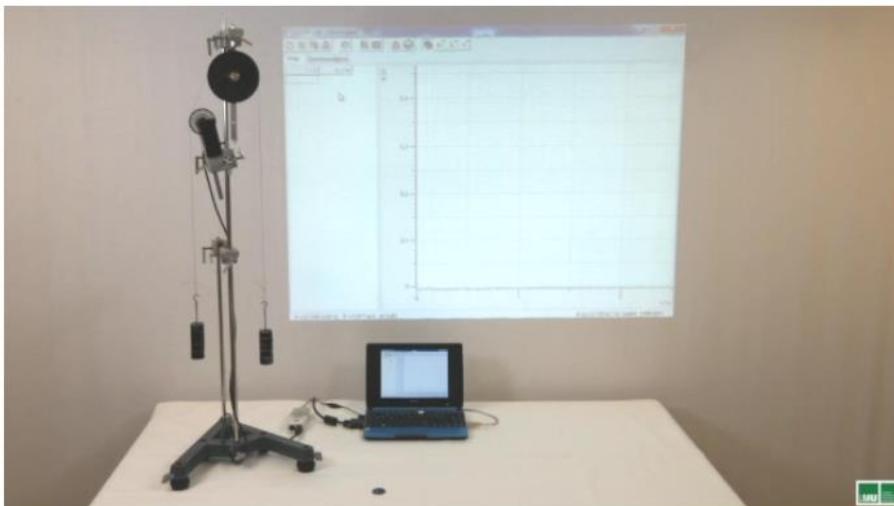
Ihre Aufgabe ist es, den Aufbau des Experiments und seine Durchführung zu *beschreiben*.

Versuchen Sie dabei, möglichst genau Ihre Beobachtung in Worte zu fassen und lenken Sie dabei gezielt die Aufmerksamkeit des Betrachters auf die gerade wichtige Position.

Verwenden Sie zudem eine möglichst genaue, aber schülergerechte Fachsprache.

Sie müssen KEINE Erklärung für das liefern, was zu sehen ist. Der Teil im Video, der sich mit der "Auswertung" beschäftigt, muss NICHT bearbeitet/beschrieben werden.

Aufgabe ausblenden



Aufnahme beginnen

Aufnahme stoppen

Liste meiner Aufnahmen:



Diese Aufnahme downloaden

Diese Aufnahme abgeben



Diese Aufnahme downloaden

Diese Aufnahme abgeben

**Abbildung 21: Vertonung von Stummfilmen von Experimenten zur Förderung der Kommunikationskompetenz von Studierenden und Schülerinnen und Schülern (Videoquelle: Schweinberger et al., 2017; Schweinberger & Girwidz, 2017, 2021)**

Abgabe von	Aufgabe	abgegeben	Link zur Bewertung
Linda	Atwoodsche Fallmaschine	11.12.2018 15:58	🔗 🕒 ✖
Mireia	Atwoodsche Fallmaschine	02.12.2018 17:44	🔗 ✔ ✖
Benedikt	Atwoodsche Fallmaschine	25.11.2018 08:44	🔗 🕒 ✖
Pankraz	Atwoodsche Fallmaschine	19.11.2018 19:07	🔗 🕒 ✖
Zoe	Atwoodsche Fallmaschine	18.11.2018 17:28	🔗 ✔ ✖
Camillo	Atwoodsche Fallmaschine	18.11.2018 16:30	🔗 🕒 ✖
Mia	Atwoodsche Fallmaschine	17.11.2018 13:47	🔗 ✔ ✖
Julian	Atwoodsche Fallmaschine	17.11.2018 10:53	🔗 ✔ ✖
Claire	Atwoodsche Fallmaschine	16.11.2018 16:27	🔗 ✔ ✖
Katharina	Atwoodsche Fallmaschine	03.12.2018 21:07	🔗 ✔ ✖
Luca	Atwoodsche Fallmaschine	16.11.2018 14:42	🔗 ✔ ✖
Lena	Atwoodsche Fallmaschine	16.11.2018 14:23	🔗 ✔ ✖
Anna-Maria	Atwoodsche Fallmaschine	16.11.2018 15:04	🔗 ✔ ✖
Sophie	Atwoodsche Fallmaschine	15.11.2018 21:14	🔗 ✔ ✔

Abbildung 22: Auflistung aller abgegebenen Vertonungen

- **Rote Sanduhr:** Bearbeitet aber noch nicht abgegeben
- **Grüner Haken:** Abgegeben
- **Rotes Kreuz:** noch kein Feedback
- **2 grüne Haken:** Abgegeben und Feedback vorhanden

Die angegebenen Namen sind fiktiv und können mit keiner tatsächlichen Person in Verbindung gebracht werden. (eigene Darstellung)

Insgesamt stellt dieses Modul von PUMA@LMU im Sinne von Tversky et al. (2002) eine Anwendung dar, die einen besonderen Mehrwert einer multimedialen Lernumgebung gegenüber den herkömmlichen Unterrichtsmethoden bietet.

Das soeben für die Videovertonung beschriebene Vorgehen zum Feedback kann gleichsam auf das Feedback bei Videoanalysen übertragen werden. Jedoch wird hier im Moment der Aufzeichnung bereits automatisch eine Folie mit dem aufgezeichneten Video erstellt und dem oder der Lernenden zugänglich gemacht. Nachdem der Dozent die Aufzeichnung analysiert hat, wird dem oder der Lernenden schließlich das Feedback angezeigt.

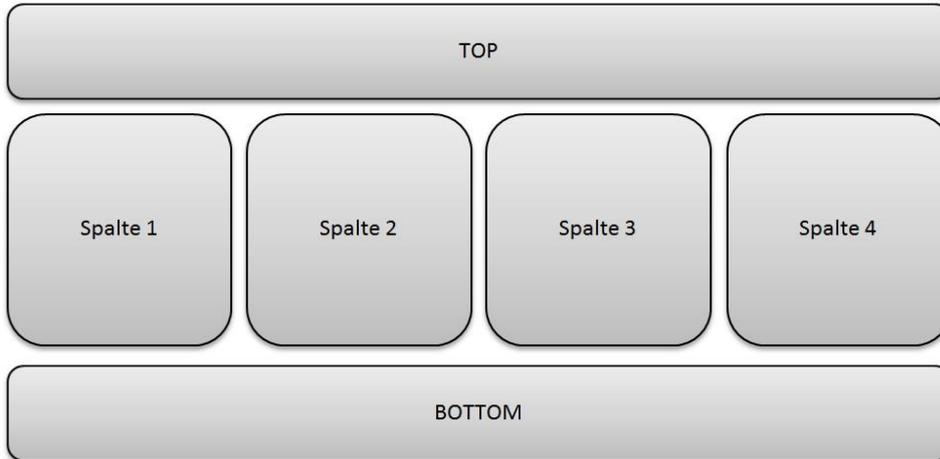


Abbildung 23: Grunddesign einer Präsentationsfolie (eigene Darstellung)

### 5.3.5 Folien zur Präsentation

Präsentationsfolien ermöglichen die Kombination verschiedenster Inhalte, etwa von Simulationen, Animationen, Experimentiervideos, Bildern, Texten, PDFs, Geogebra-Konstruktionen, LearningApps, YouTube-Videos und vielen anderen Elementen aus diversen Quellen. Für den Einsatz von Multimediaanwendungen im Physikunterricht ist diese Funktion von besonderer Bedeutung, denn dadurch können Lehrkräfte auf einfache Art und Weise beispielsweise verschiedene Darstellungsformen miteinander verbinden und so die in Abschnitt 4.3 beschriebenen Vorteile beim Lehren und Lernen mit Multimedia nutzen.

Für jede Präsentationsfolie kann ein eigenes Grunddesign (ein-, zwei-, drei- oder vierspaltig) individuell ausgewählt werden (vgl. Abbildung 23). Jede dieser Positionen ist nun ein möglicher Container für standardmäßig vorkonfigurierte Schnellbausteine oder selbstkonfigurierbare Bausteine (vgl. Abbildung 24), analog zu den einzelnen Platzhaltern in PowerPoint-Präsentationen.

Die Schnellbausteine beinhalten bei PUMA@LMU Experimentiervideos, Simulationen, Animationen und Bereiche zur Freitexteingabe für die Lehrkraft

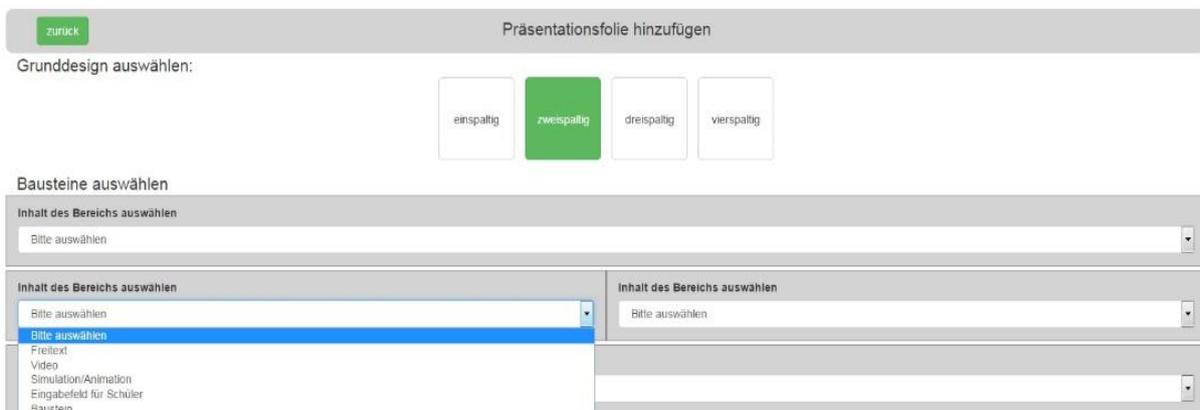


Abbildung 24: Auswahl eines Schnellbausteins aus einem Dropdown-Feld (eigene Darstellung)

oder für Schülerantworten. Schnellbausteine sind standardmäßig vorkonfiguriert und können meist mit einem Klick eingebunden werden.

Geogebra-Materials (früher: Geogebra-Tube) ist eine Sharing-Plattform von Geogebra, auf die Lehrkräfte kostenlos ihre Geogebra-Dokumente (ggb) hochladen können. Andere Lehrkräfte können diese Inhalte downloaden. Schüler können diese Dokumente online bearbeiten, ohne lokal eine Geogebra-Installation vornehmen zu müssen.

Daneben gibt es Bausteine, die individuell gestaltet und an beliebigen Stellen in verschiedenen Folien und verschiedenen Kursen eingesetzt werden können. Diese Bausteine enthalten beispielsweise Multiple-Choice-Fragen, Word-Clouds, Abstimmungen, YouTube-Videos, Aufgaben zur Ordnung von Aussagen oder auch Learning-Apps. Ferner sind Bausteine möglich, die Geogebra-Materials-Inhalte, andere Webseiten oder auch herkömmliche PowerPoint-Präsentationen aus dem Bestand der Lehrkraft oder des Dozenten in die Präsentation integrieren. Für eine detaillierte Funktionsbeschreibung der einzelnen Bausteine wird auf die PUMA@LMU-Dokumentation im Anhang dieser Arbeit verwiesen.

### 5.3.6 Einstiegsfolien/Tutorial

Der im Folgenden vorgestellte Beispielkurs bietet einen Überblick über viele Funktionen von PUMA@LMU und dient dabei als Tutorial-Kurs zum Kennenlernen der Funktionalitäten und des Umgangs mit dem zunächst unbekanntem Tool. Die einzelnen Folien werden im Rahmen der Lehrerfortbildung (vgl. Abschnitt 5.2.1) von den Teilnehmerinnen und Teilnehmern erstellt, um sich in PUMA@LMU einzuarbeiten. Nachfolgend soll deshalb lediglich ein kurzer Überblick über diese Folien gegeben werden. Für das exakte Vorgehen, wie die Folien erstellt werden können, wird an dieser Stelle auf die Anleitung im Anhang dieser Arbeit verwiesen.

#### 5.3.6.1 Tutorial 0 – Was ist PUMA@LMU?

PUMA@LMU ist hoch spezialisiert auf den Physikunterricht und enthält zahlreiche Standardbausteine zur schnellen Auswahl.

Zu Beginn des Workshops erhalten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer auf einer Info-Folie Informationen über PUMA@LMU. Dabei wird besonders betont, dass PUMA@LMU ein eigens für den Physikunterricht konzipiertes Autorensystem ist, in dem spezielle physikspezifische Bausteine (Experimentiervideos, Simulationen, Animationen etc.) zu den verschiedenen Themengebieten enthalten sind. Diese Bausteine können miteinander kombiniert werden und ermöglichen so eine individuelle und für die Lehrkraft schnell und einfach umsetzbare Gestaltung online-basierter Multimedialeinhalte. Zudem bietet PUMA@LMU innovative Aufgabentypen zur Förderung der Kommunikationskompetenz von Schülerinnen und Schülern.

Tutorial 1 - Texte, Formeln und Bilder

Kepler 1

Die Planeten bewegen sich auf Ellipsenbahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

Kepler 2

In gleichen Zeiten überstreicht die Verbindungslinie Sonne-Planet gleiche Flächen.

Kepler 3

Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen ihrer großen Halbachsen.

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{konstant}$$

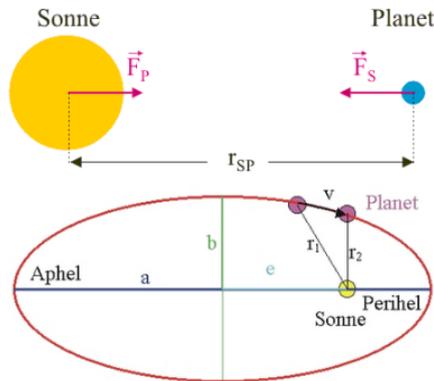


Abbildung 25: Erste Demonstrationsfolie, mit der grundlegende Funktionen beim Umgang mit dem Texteditor vorgestellt werden. Dabei geht es nicht zuletzt auch um den Upload von Bildern (LeFi Physik, 2017)

PUMA@LMU bietet zudem die Möglichkeit, auf bestehende und geteilte Inhalte von anderen Lehrkräften der gleichen Schule und/oder der gesamten Community zurückzugreifen, diese mit wenigen Handgriffen an die eigenen Bedürfnisse anzupassen und schließlich den eigenen Schülerinnen und Schülern zur Bearbeitung zur Verfügung zu stellen.

5.3.6.2 Tutorial 1 – Texte, Formeln und Bilder

Mit der ersten eigentlichen Tutorial-Folie lernen die Teilnehmerinnen und Teilnehmer, wie sie Inhalte mit dem Schnellbaustein ‚Freitext‘ erstellen können.

Tutorial 2 - Simulationen und Animationen

Hinter dem 3. KEPLER'schen Gesetz steckt das Newton'sche Gravitationsgesetz

Die Gravitationskraft bewirkt eine Beschleunigung, die einen Massekörper (hier die Masse des Planeten) in der Nähe eines anderen massereichen Körpers (hier die Masse der Sonne  $m_S$ ) auf die charakteristische Bahn (Ellipsenbahn oder Hyperbelbahn) zwingt. Im einfachsten Fall der Kreisbahn ist diese beschleunigende Kraft senkrecht zur Bewegungsrichtung und bewirkt nur eine Änderung der Bewegungsrichtung nicht eine Änderung des Geschwindigkeitsbetrags, sie wirkt als Zentripetalkraft mit  $\vec{F}_{ZP}$  mit  $F_{ZP} = m_P \cdot \omega^2 \cdot r$ . damit ergibt sich:

$$F_G = F_{ZP} \Leftrightarrow G \cdot \frac{m_S \cdot m_P}{r_{SP}^2} = m_P \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot r_{SP} \Leftrightarrow \frac{T^2}{r_{SP}^3} = \frac{4 \cdot \pi^2}{G \cdot m_S}$$

Es gilt also folgender Zusammenhang:

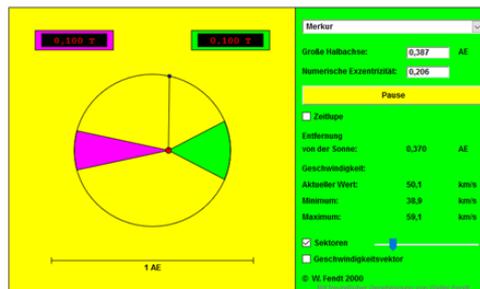
$$\frac{T^2}{r^3} = C$$

Für Ellipsenbahnen ergibt sich dann allgemein:

$$\frac{T^2}{a^3} = C$$

Mit der Konstanten C:

$$C = \frac{4 \cdot \pi^2}{G \cdot m_{Zentralobjekt}}$$



Die Seite wird nicht richtig dargestellt? Dann klicken Sie bitte [hier](#)

Abbildung 26: Mit der zweiten Tutorial-Folie werden Text und Simulationen bzw. Animationen oder Videos miteinander kombiniert (Bild: Walter Fendt, 2000)

Dabei erfahren sie auch, dass sie mathematische Formeln sowohl mit LATEX-Code oder mit Hilfe eines WYSIWYG-Editors einfügen können. Bei Bildern erfolgt letzteres einerseits über die Auswahl bereits hochgeladener Bilder über ein Webinterface oder durch Drag&Drop von einem lokalen Ordner.

### 5.3.6.3 Tutorial 2 – Simulationen und Animationen

Mit der zweiten Folie erfahren die Teilnehmerinnen und Teilnehmer, wie sie Experimentiervideos, Simulationen und Animationen in eine Präsentation einbinden. So sollen sie den eben erstellten Baustein ‚Freitext‘ mit einer passenden Simulation zum Thema ‚Keplergesetze‘ kombinieren. Damit lassen sich theoretische Herleitungen in einer anderen, hier graphischen Repräsentationsform veranschaulichen.

### 5.3.6.4 Tutorial 3 – Kombination von Bausteinen

Mit der dritten Folie erstellen die Teilnehmerinnen und Teilnehmer eine Kombination einer Simulation mit einer Multiple-Choice-Abfrage. Hierzu wird zunächst der Baustein ‚Multiple-Choice‘ konfiguriert, indem die einzelnen Antwortoptionen eingegeben und als richtige oder falsche Antwort gekennzeichnet werden. Mit dieser Kombination erhalten die Schülerinnen und Schüler beispielsweise einen konkreten Arbeitsauftrag, bei dem sie ein Experiment simulieren sollen, um damit die einzelnen Antwortoptionen zu verifizieren. Damit wird der Wissenserwerb bzw. -aufbau mit einem Wissenstest kombiniert. Somit lassen sich beispielsweise die Kompetenzbereiche ‚Erkenntnisgewinnung‘ und ‚Fachwissen‘ fördern.

Tutorial 3 - Kombination verschiedener Bausteinen

Die Seite wird nicht richtig dargestellt? Dann klicken Sie bitte [hier](#)

Balanceakt

Die Seite wird nicht richtig dargestellt? Dann klicken Sie bitte [hier](#)

Zeige

- Massen
- Kräfte an Gegenständen
- Niveau

Position

- Keine
- Maßstäbe
- Markierungen

Platziere zunächst eine Masse von 10 kg auf der linken Seite des Hebels.  
Füge nun auf der rechten Seite ein Massestück hinzu, sodass sich der Hebel im waagrechten Zustand (Gleichgewicht) befindet.  
Überprüfe die nachfolgenden Aussagen und kennzeichne die richtigen Antworten!

deine Antwort(en)

Ein Massestück mit 5 kg ist gleich weit vom Drehpunkt entfernt wie das Massestück mit 10 kg.	stimmt nicht ✓
Das Massestück mit 5 kg ist nur halb so weit vom Drehpunkt entfernt wie das Massestück mit 10 kg.	stimmt ✗
Das Massestück mit 5 kg ist doppelt so weit vom Drehpunkt entfernt wie das Massestück mit 10 kg.	stimmt nicht ✗
Ein Massestück mit 2 kg muss dreimal so weit vom Drehpunkt entfernt sein, wie ein Massestück von 6 kg, wenn der Hebel waagrecht sein soll.	stimmt nicht ✗

**Abbildung 27:** Präsentationsfolien bieten beispielsweise die Möglichkeit der Kombination von Simulationen und Multiple-Choice-Aufgaben. Die Lösung dieser Aufgaben erhalten die Schülerinnen und Schüler sofort nach einem Klick auf ‚Abgeben‘ (Simulation: Perkins et al., 2014)

### 5.3.6.5 Tutorial 4 – Weitere Bausteine

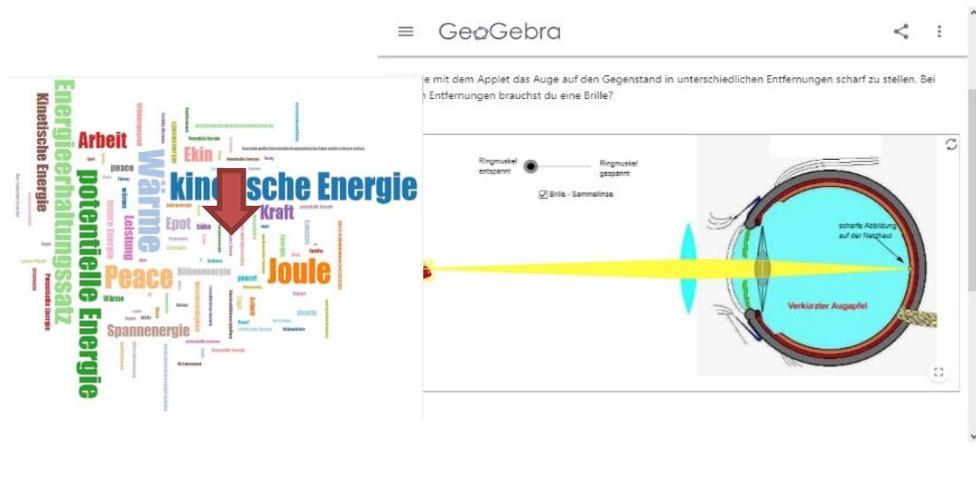
Die vierte Tutorial-Folie ist zweigeteilt in 4a und 4b. Mit diesen beiden Folien lernen die Teilnehmerinnen und Teilnehmer weitere Bausteine kennen. Darunter ist neben WordClouds und Abstimmungen auch der Baustein zum Einbinden von Webseiten enthalten. Nachdem sich die ersten beiden Bausteine weitgehend selbst erklären, soll an dieser Stelle lediglich der Baustein ‚Webseite einbinden‘ näher beschrieben werden. Mit diesem lassen sich nicht nur fremde Webseiten in die Multimediapräsentation integrieren, sondern beispielsweise auch GeoGebra-Simulationen, PowerPoint-Präsentationen, LearningApps oder auch nur PDFs in einem PDF-Viewer.

### 5.3.6.6 Tutorial 5 – YouTube-Videos bewerten

Mit der fünften Tutorial-Folie wird den Teilnehmerinnen und Teilnehmern ein weiteres Anwendungsszenario vorgestellt. Darin wird der Baustein ‚YouTube-Video‘ mit dem Baustein ‚Freitext für Schüler‘ kombiniert. Wählt die Lehrkraft beispielsweise ein fehlerhaftes Video aus, hat sie die Möglichkeit, den Schülerinnen und Schülern die Aufgabe zu stellen, das Video zu betrachten, die Fehler zu suchen und zu korrigieren. Ihre Ergebnisse dokumentieren die Schülerinnen und Schüler im benachbarten Eingabefeld. Die Lehrkraft erhält schließlich eine Übersicht über alle Schülerantworten.

Dieses Aufgabenformat ermöglicht die Förderung unterschiedlichster Kompetenzbereiche. Zunächst wird der Kompetenzbereich ‚Kommunikation‘ gefördert, da die Schülerinnen und Schüler dazu angehalten sind, das Video zu bewerten, einzuordnen und in einer möglichst adäquaten, physikalisch richtigen Form niederzuschreiben. Je nach konkreter Fragestellung lassen sich auch unterschiedliche Anforderungsniveaus realisieren. Denn die bloße Fehlersuche entspricht dem Anforderungsbereich I (einfache Sachverhalte in vorgegebenen Formen darstellen) und die Fehlerkorrektur dem Anforderungsbereich II bis III (vorgegebene bzw. eigene Auswahl von Kommunikationsformen situations- und adressatengerecht einsetzen).

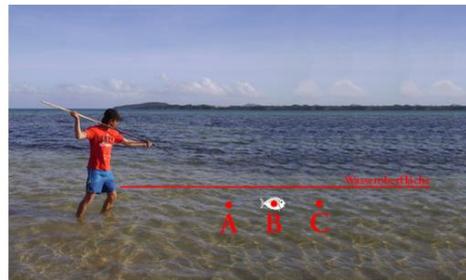
Neben der Förderung der Kommunikationskompetenz bietet sich bei diesem Aufgabentyp ferner die Möglichkeit der Förderung des Fachwissens. Dabei werden die Anforderungsbereiche I (Wiedergeben), II (Wissen auf einfache Kontexte anwenden) und III (Wissen auf teilweise unbekannte Kontexte übertragen) je nach verwendetem Video angesprochen. Demnach ist die Aufgabe, bei der ein Video verwendet wird, das beispielsweise ein im Unterricht behandeltes Experiment beschreibt, dem Anforderungsbereich I zuzuordnen.



Stelle dir folgendes Szenario vor:

Die nachfolgend abgebildete Person ist auf einer einsamen Insel gestrandet und seine Vorräte sind erschöpft. Er möchte deshalb, wie er in vielen Filmen gesehen hat, mit einem selbstgebauten Speer fischen.

Welchen Rat würdest du ihm geben?



Der Fischer soll auf Position ... zielen

- A (hinter den Fisch zielen, also näher zu ihm heran)
- B (genau auf den Fisch zielen)
- C (vor den Fisch zielen, also weiter von ihm weg)

**Abbildung 28:** In der vierten, zweigeteilten Tutorial-Folie lernen die Teilnehmerinnen und Teilnehmer weitere Bausteine kennen. Darunter finden sich WordClouds (links oben), Abstimmungen (rechts unten) und der Baustein ‚Webseite einbinden‘ (Fischerbild: Eigendarstellung; Abbildung Auge: Schneider, 2011)

Zudem wird mit diesem Aufgabentyp ein Beitrag zur Medienerziehung geleistet, da die Schülerinnen und Schüler erkennen, dass Videos nicht notwendigerweise richtig sind, nur weil sie im Internet zu finden sind.

### 5.3.6.7 Tutorial 6 – Videovertonung

Die sechste Tutorial-Folie zur Videovertonung wurde bereits ausführlich in Unterkapitel 5.3.4 beschrieben. Deshalb wird an dieser Stelle auf dieses Unterkapitel verwiesen.

## 5.4 Fortbildungsmodul zur Astrophysik

In diesem Abschnitt wird ein Modul der Lehrerfortbildung vorgestellt, mit dem exemplarisch aufgezeigt wird, wie aktuelle Forschungsdaten durch eine multimediale Gestaltung in den Physikunterricht integriert werden können. Als Grundlage dienen hierfür die Anforderungen des aktuell gültigen Lehrplans der Astrophysik der zwölften Jahrgangsstufe an bayerischen Gymnasien:

*„Wo immer möglich fließen Ergebnisse aus aktuellen Forschungsprojekten in den Unterricht ein, da die steigende Präzision astrophysikalischer Messungen*

*fortwährend zu einer Fülle neuer Informationen führt, die ganz entscheidend zum tieferen Verständnis des Universums beitragen.“ (StMUK Bayern, 2004, S. 2)*

Im Speziellen soll der Fokus auf die Entfernungsbestimmung in der Milchstraße und dem Universum gelegt werden, um einen inneren Zusammenhang zwischen den einzelnen Lektionen zu gewährleisten und diesen Themenbereich aus unterschiedlichen Perspektiven zu betrachten. In Abschnitt 5.4.2 wird die Entfernungsbestimmung mit Hilfe von Sternhaufen beleuchtet, in Abschnitt 5.4.3 mit Hilfe von Cepheiden und schließlich in Abschnitt 5.4.4 mit Supernovae Ia.

In allen drei Abschnitten stellt der Autor dieser Arbeit neu entwickelte Applikationen vor, bei deren Entwicklung die in Abschnitt 5.4.1 zusammengefassten didaktischen Rahmenbedingungen besonders berücksichtigt wurden. Der Source-Code dieser Webanwendungen ist unter der URL <https://github.com/PM84/MPe-Astro-Apps> abrufbar. Sie sind ohne Installation auf Seiten des Clients im Browser lauffähig.

Die im Folgenden beschriebenen Lerneinheiten sind zudem Teil der in Kapitel 6 beschriebenen Fortbildungsveranstaltung, die ihrerseits die Grundlage für die empirischen Untersuchungen (vgl. Abschnitt 6) dieser Arbeit bildet.

### 5.4.1 Didaktischer Rahmen

Beim Experimentieren mit Demonstrations- und Schülerexperimenten sollen Schülerinnen und Schüler nicht nur Fachwissen erwerben, sondern darüber hinaus auch Kompetenzen in der Erkenntnisgewinnung und der Durchführung von Experimenten. Alle damit einhergehenden Fähigkeiten können dabei unter dem Begriff ‚experimentelle Kompetenzen‘ subsummiert werden (Gut-Glanzmann, 2012). Das Scientific-Discovery-as-Dual-Search-Modell (SDDS-Modell) von Klahr und Dunbar (1988) beschreibt beispielsweise zunächst die Bereiche

- Experimentplanung,
- Experimentdurchführung und
- Experimentauswertung.

Im Hinblick auf die in den folgenden Abschnitten beschriebene Entwicklung multimedialer Applikationen, die beim Experimentieren in der Physik eine Hilfestellung geben sollen, können selbstredend nicht alle dieser Kompetenzbereiche des Experimentierens abgebildet und berücksichtigt werden. Insbesondere die Durchführung von Experimenten ist wegen des enormen technischen und finanziellen Aufwands nur in wenigen Fällen möglich. Deshalb bleiben hierfür im Wesentlichen zwei Möglichkeiten: Im Anschluss an die Experimentplanung werden Simulationen, virtuelle Experimente oder Augmented Reality verwendet, um etwaige Experimente zumindest zu

veranschaulichen und beispielhaft auswerten zu können (z. B. Kuhn et al., 2014; Perkins et al., 2014; Richtberg, 2018; Strzys et al., 2017), oder es wird wie gewohnt ein Experiment geplant, wobei jedoch anstatt eigener Messwerte ebensolche aus Forschungsmissionen verwendet und schließlich ausgewertet werden (Kraas et al., 2010). Viele Forschungsmissionen machen aus politischen Gründen ihre Messdaten öffentlich zugänglich. Daher stellen derartige Missionen eine schier unerschöpfliche Quelle an Messwerten dar, die im Unterricht an unterschiedlichen Stellen verwendet werden können. Im Folgenden soll ein Themenbereich ausgewählt werden, der sich auf diese Messdaten stützt. Mit dieser zweiten Möglichkeit wird insbesondere die Forderung im Lehrplan des bayerischen Gymnasiums der Oberstufe berücksichtigt: „*Ergebnisse aus aktuellen Forschungsprojekten [sollen] in den Unterricht*“ (StMUK Bayern, 2004, S. 2) eingebunden werden. Es scheint also sinnvoll, sich für die folgenden Betrachtungen auf diese Möglichkeit zu beschränken. Insgesamt bietet es sich damit an, die im SDDS-Modell der Experimentauswertung übergeordnete Komponente „*Analyse von Evidenzen*“ (Hammann et al., 2008, S. 37f) bei der Entwicklung unterrichtsrelevanter Anwendungen besonders zu berücksichtigen.

Zudem bietet das computergestützte Feedback allen Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit, ihren eigenen Arbeitserfolg zu bewerten und einzuordnen. Dies kann insbesondere für Lernende hilfreich sein, die nicht in der Lage sind, ihre experimentellen Fähigkeiten selbst passend zu bewerten (Schreiber et al., 2014; Schreiber et al., 2016). Das in Unterkapitel 4.3 ausgeführte Potential multimedialer Anwendungen und insbesondere das von multiplen Repräsentationen und neuen Darstellungsformen kann die Auswertung der Experimente ebenfalls unterstützen.

Ein weiterer zentraler Bestandteil der experimentellen Kompetenz ist das zielgerichtete Überprüfen von Hypothesen (z. B. Hammann, 2004; Kircher et al., 2015, S. 230). Tesch und Duit (2004) stellen zwar fest, dass Experimente im Schulunterricht nicht zum Testen von Hypothesen, sondern stattdessen zur Veranschaulichung von Phänomenen und Konzepten genutzt werden sollten. Dazu gehören insbesondere flexibel einsetzbare und auf andere Anwendungskontexte übertragbare Handlungs- und Prozessfähigkeiten. Das Hypothesenprüfen ist jedoch ein integraler Bestandteil des Wissensaufbaus innerhalb der Physik und anderer Naturwissenschaften und demnach nach Wellington (1988) ein besonders wünschenswertes Lernziel. Zudem stellt das zielgerichtete Hypothesenprüfen eine Schnittstelle zwischen den großen physikalischen Fachbereichen – Experimentalphysik und Theoretische Physik – dar, wodurch es per se ein für den Unterricht interessanter Aspekt ist.

Da Experimente ein integraler Bestandteil des Physikunterrichts sind und die damit verbundene experimentelle Kompetenz einen Grundstein einer adäquaten naturwissenschaftlichen Ausbildung bildet, soll in den folgenden Abschnitten das aus der Theorie ableitbare Potential von Multimediaanwendungen (siehe auch Kapitel 4) exemplarisch im Rahmen der Entwicklung mehrerer themenspezifischer Applikationen aufgezeigt werden. Hierzu wird ein Themenbereich ausgewählt, der für den Unterricht in der Astrophysik der gymnasialen Oberstufe eine zentrale Rolle spielt und gleichzeitig mit klassischen Schulexperimenten in der Regel nicht abgedeckt werden kann. Die Applikationen sollen ein ergänzendes Angebot für Schülerinnen und Schüler, Lehrkräfte und gegebenenfalls sogar für Studierende darstellen, das flexibel in unterschiedlichen Unterrichtsformen einsetzbar ist. Obwohl, wie in Abschnitt 4.3.3 erläutert, multimediale Anwendungen neue Möglichkeiten der Unterrichtsgestaltung schaffen, müssen sowohl bei der Themenauswahl als auch in der Entwicklung unterschiedliche Aspekte bedacht werden, denn neue Medien sollen nicht nur um ihrer selbst willen eingesetzt werden (R. E. Clark, 1983; Stadtfeld, 2004, S. 168). Um positive Effekte auf die Motivation und den Lernerfolg zu erzielen, müssen entsprechende Anwendungen also so entwickelt sein, dass sie keinem Selbstzweck dienen (Lange & Merle, 2011), Schülerinnen und Schülern durch ihre Anwendung neue Lernerfahrungen ermöglichen (Kozma, 1994) und zudem in einer passenden Form im Unterricht eingesetzt werden können (z. B. R. E. Mayer, 2002).

Eine Analyse des aktuell gültigen Lehrplans der Oberstufe (Jahrgangsstufe 12) des bayerischen Gymnasiums (StMUK Bayern, 2004) macht deutlich, dass der Themenbereich Astronomie und Astrophysik besonders geeignet ist, um Messwerte aus Forschungsmissionen in den Unterricht zu integrieren. Im Speziellen gilt dies für den übergeordneten Themenbereich Entfernungsbestimmung, der sich wie ein roter Faden durch das ganze Schuljahr und durch mehrere Themenbereiche zieht. In diesem Themenbereich stehen zahlreiche öffentlich zugängliche Datenquellen zur Verfügung (z. B. Gaia Collaboration et al., 2018; Guillochon et al., 2017). Weiter manifestiert sich die zentrale Bedeutung des Themenfeldes in ihrem häufigen Vorkommen in den Abiturprüfungen. In den zehn Physik-Abiturprüfungen des achtstufigen Gymnasiums (G8) in Bayern zwischen 2011 und 2020 kam in jeder Prüfung eine Aufgabe vor, die mit der Entfernungsbestimmung zusammenhängt.

Ein weiterer zentraler Aspekt, der ebenfalls für die Auswahl dieses Inhaltes spricht, umfasst das Fehlen von adäquaten Experimenten und dabei insbesondere den enormen Beobachtungsaufwand, der zur Ermittlung der nötigen Daten betrieben werden muss. Dies kann keine Schule auch nur ansatzweise leisten – insbesondere auch deshalb nicht, da zahlreiche Effekte, die zur

Entfernungsbestimmung herangezogen werden, hochkomplexe und damit teure Instrumente erfordern und zudem nur sporadisch auftreten und somit einen längerfristigen Beobachtungshorizont benötigen. Selbstständige experimentelle Aktivitäten von Schülerinnen und Schülern sind dadurch nahezu ausgeschlossen. Ein entsprechendes computergestütztes Angebot kann daher Unterrichtsszenarien ermöglichen, die bisher nur eingeschränkt realisierbar waren. Darüber hinaus bietet dieser Themenbereich wegen seiner großen Bedeutung im Schulunterricht die Möglichkeit, Querverbindungen zu anderen Themenbereichen wie beispielsweise der Spektroskopie herzustellen.

Als Herausforderung bei der Verwendung von Messdaten aus Forschungsmissionen im Unterricht können die Daten selbst gelten. Denn diese liegen in der Regel im Rohformat vor und müssen zunächst aufbereitet und in eine Form gebracht werden, sodass sie in geeigneter Weise einsetzbar sind. Dazu gehört beispielsweise die Korrektur von Auslöschungseffekten oder der Rotverschiebung. Zudem ist den Schülerinnen und Schülern lediglich das SI-Einheitensystem bekannt und nicht das in den Daten häufig verwendete cgs-Einheitensystem. Somit müssen auch Umrechnungen durchgeführt und Anpassungen an den Darstellungsformen vorgenommen werden. All diese Maßnahmen sollen die Komplexität der Darstellung und damit den Cognitive Load auf Seiten der Schülerinnen und Schüler reduzieren (vgl. Unterkapitel 4.3.5).

Ein Schwerpunkt, der bei der Entwicklung der Anwendungen gesetzt wurde, ist das Prinzip der interaktiven Gestaltung (vgl. Abschnitt 4.3.3.1). Die Schülerinnen und Schüler haben in allen Anwendungen die Möglichkeit, die Darstellungen zu beeinflussen. Sie können beispielsweise Teile der Grafiken verschieben, Hilfslinien einblenden und positionieren oder auch zwischen verschiedenen Beobachtungsbändern, Lichtkurven oder Spektren wechseln, um jeweils unterschiedliche Aspekte zu betrachten und diese Erkenntnisse bei der Bearbeitung von Aufgaben zu berücksichtigen. Dadurch ergibt sich auch eine gewisse Offenheit der mit den Anwendungen kombinierbaren Aufgabenstellungen. So können die Schülerinnen und Schüler zum Teil gänzlich frei entscheiden, welchen der möglichen Lösungswege sie beschreiten.

Durch den Wechsel zwischen verschiedenen Beobachtungsbändern oder von Lichtkurven zu Spektren stehen den Schülerinnen und Schülern multiple Repräsentationen des gleichen Ereignisses zur Verfügung, die jeweils andere Rückschlüsse ermöglichen. Damit soll das Erreichen des in Unterkapitel 4.3.3.2 beschriebenen Ziels des Physikunterrichts – Schülerinnen und Schüler in die Lage zu versetzen, in angemessener Weise verschiedene Repräsentationsformen zu verwenden und sie darin zu fördern, gezielt zwischen diesen zu wechseln – gefördert werden.

Insgesamt sollen diese Beispielanwendungen die Schülerinnen und Schüler dazu animieren, sich intensiv mit dem physikalischen Inhalt zu beschäftigen, was nach R. Mayer (2014) eine Voraussetzung für einen effizienten Lernvorgang darstellt, nach Wong et al. (2011) zu einer größeren Verarbeitungstiefe und nach Nussbaum, Alcoholado und Büchi (2015) durch die interaktive und offene Lernform zu einem besonders effektiven Lernprozess führt.

### **5.4.2 Veranschaulichung der Sternentwicklung mit Hilfe des Hertzsprung-Russel-Diagramms (HRD)**

Für die Sternentwicklung ist die Beobachtung zahlreicher Sterne nötig, die sich in einem ähnlichen Entwicklungszustand befinden und dabei ähnliche Eigenschaften besitzen. Deshalb soll im Folgenden zunächst das Hertzsprung-Russel-Diagramm (HRD) beschrieben werden, mit dessen Hilfe verschiedene Aussagen über Sterne und deren Entwicklungsstadien möglich sind. Die Erkenntnisse daraus fließen schließlich in die Entfernungsbestimmung von Sternhaufen ein.

#### **5.4.2.1 Grundlagen der Entfernungsbestimmung mit Sternhaufen**

Die Entwicklung von Sternen erfolgt auf sehr großen Zeitskalen von teils mehreren zehn Milliarden Jahren. Deshalb ist es nicht nur für Schülerinnen und Schüler von Interesse, warum trotz fehlender vollständiger Beobachtung der Entwicklung eines Sterns so viel über die konkreten Entwicklungsschritte von Sternen bekannt ist. Damit Aussagen über die einzelnen Entwicklungsschritte getroffen werden können, wird eine große Anzahl von Sternen benötigt, die annähernd eine identische Masse und chemische Zusammensetzung besitzen. Statistisch ergibt sich dann eine Auswahl von Sternen mit ähnlichen Eigenschaften, aber unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Diese Daten müssen jedoch durch langwierige Beobachtungen einzelner Sterne gesammelt und im Anschluss ausgewertet werden.

Um die Erforschung von Sternen und deren Entwicklung zu beschleunigen, wurde die Gaia-Mission gestartet, die eine Durchmusterung des Himmels und eine Klassifizierung von Sternen als Ziel hat, um schließlich eine 3D-Karte der Milchstraße zu erhalten. Am 25. April 2018 wurde der Katalog „Gaia Data Release 2“ (Gaia Collaboration et al., 2018) vorgelegt, der insgesamt 1.692.919.135 Sterne enthält und größtenteils die exakten Positionen, die Helligkeiten und in den meisten Fällen auch weitere Eigenschaften wie Farben, Parallaxen und Eigenbewegungen der Sterne umfasst. Damit beinhaltet dieser Katalog mehr als 1 % aller Sterne der Milchstraße und ist eine für jeden, d. h. auch für Lehrkräfte, frei zugängliche Datenquelle, die unter anderem zur Erforschung der Entwicklung von Sternen genutzt werden kann. Durch eine Datenbankabfrage lassen sich Kandidaten für eine detailliertere Beobachtung mit anderen Teleskopen in

anderen Spektralbereichen finden. Allein in den ersten Monaten nach der Veröffentlichung des Data Release 2 sind mehr als 1000 wissenschaftliche Publikationen darauf zurückzuführen.

Werden die Sterne auf Grundlage ihrer beobachteten Eigenschaften in ein Diagramm eingetragen, auf dessen x-Achse die Oberflächentemperatur oder auch der Farbindex eines Sterns und auf dessen y-Achse die absolute Helligkeit angetragen ist, so ergibt sich ein sogenanntes Hertzsprung-Russell-Diagramm, benannt nach Henry Norris Russell, der diese Darstellung auf Basis von Daten von Ejnar Hertzsprung entwickelte. Neben diesen Achsenbelegungen gibt es noch weitere, die im Folgenden wegen des beabsichtigten schulischen Bezugs indes nicht näher betrachtet werden. In Abbildung 29 sind Hertzsprung-Russell-Diagramme auf Basis von mit Gaia gewonnenen Daten dargestellt.

Mit Hilfe des HRD sind zahlreiche Eigenschaften von Sternen ermittel- und graphisch darstellbar. Für den schulischen Kontext sind jedoch im Wesentlichen die Entfernung mittels Entfernungsmodul, die qualitative Alterseinstufung eines Sternhaufens im Vergleich zu anderen, die Verweildauer auf der Hauptreihe und die Massenbestimmung von besonderem Interesse.

Zur Entfernungsbestimmung mittels HRD werden die Helligkeit des Sterns in einer von der Erde aus messbaren ‚scheinbaren Helligkeit‘ sowie ein vom Abstand unabhängiger Maßstab, die ‚absolute Helligkeit‘, benötigt.

Die Einstufung der scheinbaren Helligkeit erfolgt mit Hilfe des Weber-Fechner-Gesetzes, das die subjektiv empfundene Stärke von Sinneseindrücken, hier optischer Natur, proportional zum Logarithmus der objektiven Intensität des physikalischen Reizes darstellt:

$$\Delta m = k \cdot \int_1^2 \frac{dR}{R} = k \cdot [\ln R]_1^2 = k \cdot \ln \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (5.1)$$

Dabei ist  $m$  die empfundene Helligkeit auf einer historisch zunächst sechstufigen Skala von 1 bis 6 (nach Hipparch, ca. 190–120 v. Chr.), die heute jedoch in beide Richtungen erweitert wurde. Dabei gilt die Grundannahme bzw. Festlegung, dass ein Stern der Größenklasse 1 exakt 100-mal so hell wahrgenommen wird wie ein Stern der Größenklasse 6.  $\Delta m$  ist demnach der Helligkeitsunterschied zwischen zwei zu vergleichenden Sternen.  $R_i$  stellt jeweils den Reiz dar, den die beiden Sterne auslösen, und kann mit der physikalischen Größe der Strahlungsintensität gleichgesetzt werden. Demnach gilt:

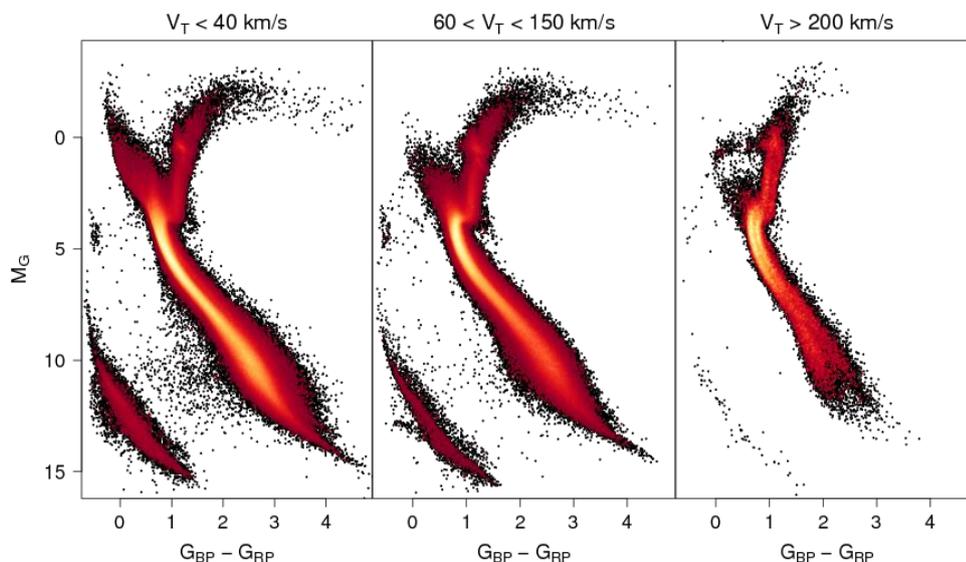


Abbildung 29: Gaia Hertzsprung-Russell-Diagramme (Babusiaux et al., 2018, 17)

y-Achse: absolute Helligkeit; x-Achsen: GBP-GRP-Farbindizes

Die einzelnen Diagramme stellen jeweils eine Auswahl an Sternen dar, die in einem gegebenen Korridor für die Tangentialgeschwindigkeit  $v_T$  liegen. Es wurden nur Sterne verwendet, deren relative Parallaxenunsicherheit unter 10 % liegt und die eine niedrige Extinktion ( $E(BV) < 0,015$ ) besitzen. Die Farbskala repräsentiert die Quadratwurzel der Sternanzahl an der jeweiligen Stelle im HRD.

$$\Delta m = m_2 - m_1 = k \cdot \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = k \cdot \ln(n) \cdot \log_n \frac{I_2}{I_1} \quad (5.2)$$

$$\Rightarrow m_1 - m_2 = \underbrace{k \cdot \ln 10}_{=:K} \cdot \lg \frac{I_2}{I_1} = K \cdot \lg\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \quad (5.3)$$

$$\Rightarrow m_1 - m_2 = K \cdot \lg\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (5.4)$$

Zusammen mit der skalierenden Grundannahme

$$m_1 = 1; \quad m_2 = 6; \quad I_1 = 100I_2$$

folgt für den Proportionalitätsfaktor  $K$ :

$$K = \frac{m_1 - m_2}{\lg\left(\frac{I_1}{I_2}\right)} = \frac{1^m - 6^m}{\lg\left(\frac{100 \cdot I_2}{I_2}\right)} = \frac{-5^m}{\lg(100)} = \frac{-5^m}{2} = -2,5^m \quad (5.5)$$

Damit ergibt sich für den Unterschied zweier scheinbarer Helligkeiten folgender Zusammenhang mit den gemessenen Intensitäten der zu vergleichenden Sterne:

$$m_1 - m_2 = -2,5^m \cdot \lg\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (5.6)$$

Da wegen der Abstandsabhängigkeit  $\left(I \sim \frac{1}{r^2}\right)$  der gemessenen Strahlungsintensität ein Stern, der die doppelte Entfernung, aber die vierfache Leuchtkraft besitzt, von der Erde aus gemessen gleich hell erscheint, ist dieser Maßstab allein nicht praxistauglich. Sinnvoll verwendbar für absolute Aussagen wäre dieser Zusammenhang nur dann, wenn ein Vergleichsobjekt, dessen Abstand zur Erde und dessen Eigenschaften hinreichend genau bekannt sind, als Vergleichsobjekt zur Verfügung stünde.

Davon unabhängig wurde die ‚absolute Helligkeit‘ eines Sterns als die Helligkeit definiert, die gemessen werden könnte, wenn sich eine Person in einer Entfernung von 10 pc zum Objekt befindet. Demnach folgt aus Gleichung (5.6):

$$m - M = -2,5^m \cdot \lg\left(\frac{I}{I_{10pc}}\right) \quad (5.7)$$

Dabei gilt für die Intensität:

$$I(r) = \frac{\Phi}{4\pi r^2} \quad (5.8)$$

$\Phi$  stellt die Strahlungsleistung des Sterns dar.

Werden nun nicht zwei verschiedene Sterne, sondern lediglich die scheinbare Helligkeit und die absolute Helligkeit des gleichen Sterns verwendet, kann damit die Entfernung des Sterns ermittelt werden:

$$m - M = -2,5^m \cdot \lg \left( \frac{\frac{\Phi}{4\pi r^2}}{\frac{\Phi}{4\pi (10pc)^2}} \right) \quad (5.9)$$

$$m - M = -2,5^m \cdot \lg \left( \frac{(10pc)^2}{r^2} \right) \quad (5.10)$$

$$m - M = -5^m \cdot \lg \left( \frac{10pc}{r} \right) \quad (5.11)$$

$$m - M = 5^m \cdot \lg \left( \frac{r}{10pc} \right) \quad (5.12)$$

Gleichung (5.12) heißt dann das ‚Entfernungsmodul‘ eines Sterns, was bedeutet, dass, wenn die scheinbare und absolute Helligkeit eines Sterns bekannt sind, sich mit dieser Gleichung dessen Entfernung bestimmen lässt. Das Problem liegt nun darin, dass die absolute Helligkeit in aller Regel nicht bekannt ist. Es gibt jedoch Ausnahmen. Bestimmte Sterntypen, wie  $\delta$ -Cepheiden, pulsieren periodisch mit einer Amplitude der absoluten Helligkeit, die von der Pulsationsperiode abhängig und damit von der Erde aus sehr gut messbar ist. Dies wird in Abschnitt 5.4.3 näher betrachtet. Neben den  $\delta$ -Cepheiden gibt es weitere pulsationsveränderliche Sterne, deren absolute Helligkeit bekannt oder berechenbar ist. Neben den pulsationsveränderlichen existieren noch bestimmte Arten von Supernovae, wie beispielsweise die Supernova vom Typ Ia, die immer mit der gleichen absoluten Helligkeit einhergehen und damit als Maßstab für die Entfernungsbestimmung verwendet werden können.

Zunächst wird jedoch eine weitere schulrelevante Anwendung für das Entfernungsmodul betrachtet: die Anwendung in Verbindung mit dem HRD. Mit dieser Methode können Entfernungen von Sternhaufen ermittelt werden. Hierzu werden von möglichst vielen Sternen eines Sternhaufens beispielsweise die Oberflächentemperatur (oder Farbindex) und die scheinbare Helligkeit bestimmt, um diese in ein HRD eintragen zu können. Als y-Achse dient dann die ‚absolute Helligkeit‘. Unter der Annahme, dass die Hauptreihe bei der gleichen absoluten Helligkeit liegen muss, lässt sich nun die Differenz der Helligkeiten  $\Delta m = m - M$  der Hauptreihen ermitteln. Mit Hilfe des Entfernungsmoduls kann schließlich die mittlere Entfernung des Sternhaufens ermittelt werden. Dieses Vorgehen setzt eine weitere, berechnete Grundannahme voraus, nach der die Sterne eines Sternhaufens im Vergleich zum Abstand zur Erde nahe zusammenliegen, sodass der Fehler für die Abweichung von der absoluten Helligkeit als gering eingestuft werden kann.

### 5.4.2.2 Technische Umsetzung und Auswahl der Daten

Zur Veranschaulichung der Entfernungsbestimmung von Sternhaufen mit Hilfe des HRDs wurde für die vorliegende Studie eine Webapplikation entwickelt, mit der das Prozedere der Entfernungsbestimmung durch den Helligkeitsunterschied demonstriert und von den Schülerinnen und Schülern selbst durchgeführt werden kann. Dazu enthält die Applikation Sterndaten von mehreren Sternhaufen. Ursprünglich wurde die Applikation mit Daten des Gaia Data Release 1 ermittelt, die im Sommer 2018 durch Daten des Gaia Data Release 2 ersetzt bzw. erweitert wurden.

Hierzu wurden die Sterndaten aus der zentralen und frei zugänglichen Datenbank des Gaia-Projekts der ESA (<https://www.cosmos.esa.int/>) mittels Datenbank-Query ermittelt. Exemplarisch wird das Vorgehen im Folgenden anhand des Sternhaufens M45 (Plejaden) demonstriert.

Die Abfrage erfolgt mittels der folgenden DB-Query.

```
SELECT teff_val,phot_g_mean_mag FROM gaiadr2.gaia_source WHERE
CONTAINS(POINT('ICRS', gaiadr2.gaia_source.ra, gaiadr2.gaia_source.dec),
CIRCLE('ICRS', COORD1(EPOCH_PROP_POS(56.75, 24.1167, 0, 19.7100, -44.8200,
3.5030, 2000, 2015.5)), COORD2(EPOCH_PROP_POS(56.75, 24.1167, 0,
19.7100, -44.8200, 3.5030, 2000,2015.5)),2))=1
AND phot_g_mean_flux_over_error > 50
AND phot_rp_mean_flux_over_error > 20
AND phot_bp_mean_flux_over_error > 20
AND phot_bp_rp_excess_factor < 1.3 + 0.06 * bp_rp * bp_rp
AND phot_bp_rp_excess_factor > 1.0 + 0.015 * bp_rp * bp_rp
AND visibility_periods_used > 8
AND astrometric_chi2_al / (astrometric_n_good_obs_al - 5) < 1.44 * greatest(1,
exp(-0.4 * (phot_g_mean_mag - 19.5)))
AND parallax_over_error>125
```

Dabei wird mit der Zeile:

```
SELECT teff_val,phot_g_mean_mag FROM gaiadr2.gaia_source
```

angegeben, welche Daten (teff\_val, photo\_g\_mean\_mag) aus der Tabelle des Gaia Data Release 2 (gaiadr2.gaia\_source) selektiert werden sollen.

Die Zeile

```
WHERE CONTAINS(POINT('ICRS', gaiadr2.gaia_source.ra,
gaiadr2.gaia_source.dec), CIRCLE('ICRS', COORD1(EPOCH_PROP_POS(56.75,
```

```
24.1167, 0, 19.7100, -44.8200, 3.5030, 2000, 2015.5)), COORD2(  
EPOCH_PROP_POS( 56.75, 24.1167, 0, 19.7100, -44.8200, 3.5030,  
2000,2015.5)),2))=1
```

gibt an, bei welchen Koordinaten die Sterne liegen, die selektiert werden sollen. Hierzu wird eine Auswahlsscheibe um die Koordinaten der Plejaden mit einem Radius von  $r = 2^\circ$  definiert. Die  $2^\circ$  entsprechen dabei etwa der optischen Ausdehnung am Himmel.

Mit dem Ausdruck

```
AND phot_g_mean_flux_over_error > 50  
AND phot_rp_mean_flux_over_error > 20  
AND phot_bp_mean_flux_over_error > 20
```

werden alle Sterne ausgeschlossen, deren Fehler beim mittleren photometrischen Fluss in den drei Beobachtungsbändern im Vergleich zum beobachteten Wert zu groß ist. Die Gaia-Gruppe empfiehlt dabei die obigen Grenzwerte (Gaia Collaboration et al., 2018, 3).

Der BP/RP-excess factor wird aus dem Vergleich der Summe der integrierten Flüsse des BP- und RP-Bandes in Bezug auf den Fluss im G-Band abgeschätzt und gibt den Überschuss des Flusses im integrierten BP- und RP-Band in Bezug auf das G-Band an. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Überschuss durch Hintergrund- und Kontaminationsprobleme bei den BP- und RP-Daten verursacht wird. Folglich deutet ein großer Wert dieses Faktors einer Quelle auf systematische Fehler in der BP- und RP-Photometrie hin. Daher sollen diese Sterne mittels

```
AND astrometric_chi2_al / (astrometric_n_good_obs_al - 5) < 1.44 * greatest(1,  
exp(-0.4 * (phot_g_mean_mag - 19.5)))
```

ausgeschlossen werden (Gaia Collaboration et al., 2018).

Die Zeile

```
AND visibility_periods_used > 8
```

besagt, dass jeder Stern, der in die Darstellung einfließen darf, mehr als achtmal beobachtet wurde und daher davon ausgegangen werden darf, dass deshalb die Sternparameter hinreichend genau bekannt sind. Es ist zu erwarten, dass die erhaltenen Daten umso genauer sind, je höher dieser Wert gesetzt wird. Allerdings reduziert sich mit einer höheren Schwelle auch die Menge der zur

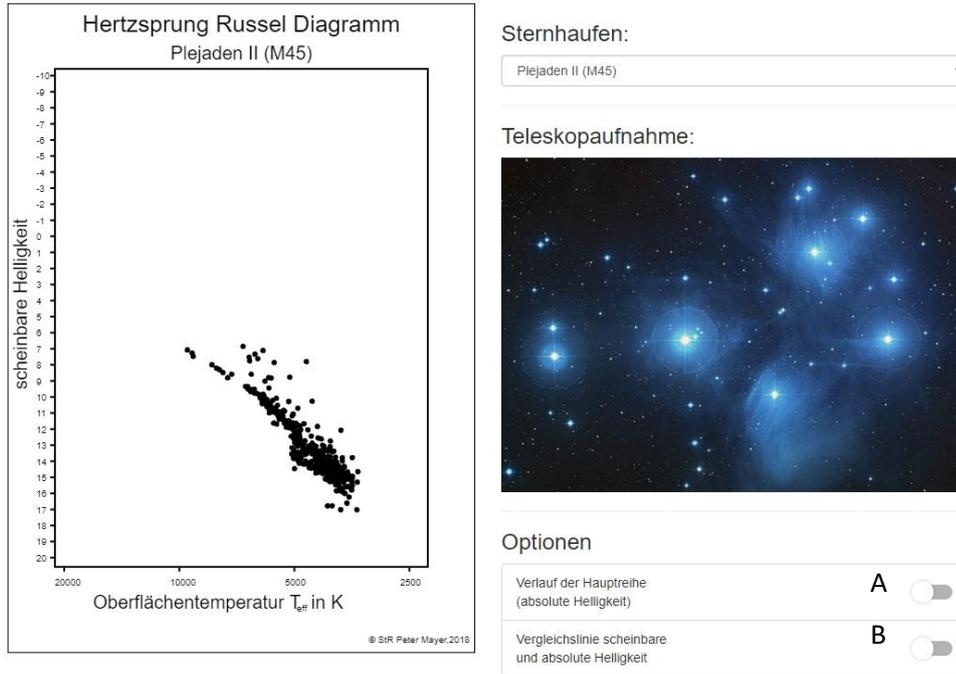
Verfügung stehenden Sterne. Der Wert 8 liefert hier einen guten Mittelweg zwischen Genauigkeit und der für die graphische Darstellung benötigten Anzahl an Sternen.

Mit der letzten Zeile

```
AND parallax_over_error>125
```

sollen diejenigen Quellen ausgeschlossen werden, deren Parallaxenfehler im Vergleich zur Parallaxe zu groß ist. Dies bedeutet, dass Sterne ausgeschlossen werden, deren Entfernung nicht hinreichend genau ermittelt werden konnte und die somit im HRD zu einer falschen Darstellung führen würden. Durch den Wert 125 werden lediglich Sterne ausgewählt, deren Parallaxen mit einem Fehler von maximal 0,8 % behaftet sind. Dies ist erneut ein guter Mittelweg zwischen Genauigkeit und der für die graphische Darstellung benötigten Anzahl an Sternen.

Insgesamt ergeben sich ohne Filtereinstellung für die Koordinaten der Plejaden etwa 110.000 Treffer in der Datenbank. Werden alle Filter angewendet, bleiben hiervon lediglich 430 Sterne übrig. Diese werden in die zu Gaia gehörende Desktopanwendung (TOPCAT) übertragen, von dort als CSV-Datei exportiert und in einen Data-Ordner auf den Webserver gelegt. Die Webapplikation erstellt daraus ein JSON-Objekt, das in die Webapplikation eingebunden wird und mit dem das entsprechende HRD gezeichnet werden kann.



**Abbildung 30: Webapplikation zur Anzeige von HRDs verschiedener Sternhaufen. Gleichzeitig wird den Schülerinnen und Schülern auch eine originale Teleskopaufnahme angezeigt. Mit den Schaltern A und B lassen sich Hilfslinien sowie der Verlauf der Hauptreihe bei der absoluten Helligkeit einblenden (Bild rechts: Soderblom et al., 2004, o.S.; Bild links: eigene Darstellung)**

#### 5.4.2.3 Beispielaufgabe

Den Schülerinnen und Schülern wird schließlich das in Abbildung 30 gezeigte HRD zusammen mit einer Teleskopaufnahme des betrachteten Sternhaufens angezeigt. Mit den Auswahlfeldern ‚Hauptreihe bei absoluter Helligkeit‘ (A) und ‚Vergleichslinie‘ (B) können die Schülerinnen und Schüler Hilfen einblenden, womit der Helligkeitsunterschied der beobachteten Hauptreihe zum Referenzverlauf bei absoluten Helligkeiten ermittelt werden. Den ermittelten Helligkeitsunterschied setzen die Schülerinnen und Schüler in das Entfernungsmodul (5.12) ein und ermitteln damit die Entfernung des Sternhaufens von der Erde. So ergibt sich beispielsweise für die Plejaden ein Entfernungsmodul von  $5,8^m$  und damit eine Entfernung von:

$$r = 10pc \cdot 10^{\frac{|\Delta m|}{5^m}} = 10pc \cdot 10^{\frac{5,8^m}{5^m}} = 144,5pc \quad (5.13)$$

Dies passt gut zum Literaturwert  $136,1 pc \pm 1,0 pc$  (Melis et al., 2014).

#### 5.4.3 Veränderliche Sterne vom Typ der Cepheiden

Ein weiteres Anwendungsszenario für das Entfernungsmodul ist die Entfernungsbestimmung mittels veränderlicher Sterne. Diese ändern ihre

Helligkeit periodisch innerhalb weniger Tage teilweise über mehrere Größenordnungen hinweg. Die physikalischen Hintergründe hiervon sollen im Folgenden näher betrachtet werden. Die Schülerinnen und Schüler arbeiten schließlich mit der Lichtkurve und der Periode-Helligkeit-Beziehung, um damit die Entfernung eines Cepheiden zu ermitteln.

### 5.4.3.1 Grundlagen der Entfernungsbestimmung mit Cepheiden

Veränderliche Sterne wie Cepheiden spielen eine zentrale Rolle in der astrophysikalischen Forschung. Die meisten abgeleiteten Merkmale eines Sterns oder eines anderen Objekts, wie Masse, Alter, Energieabstrahlung und Größe, hängen wesentlich davon ab, wie gut seine Entfernung bestimmt werden kann. Cepheiden dienen dabei nicht nur zur Entfernungsbestimmung innerhalb unserer Galaxie, sondern auch weit darüber hinaus. Sie werden zur Kalibrierung sekundärer Entfernungsindikatoren verwendet, spielen eine entscheidende Rolle bei der Festlegung der extragalaktischen Entfernungsskala und können als erste Sprosse der Entfernungsleiter, nach den Parallaxen, betrachtet werden (z. B. Madore & Freedman, 1991). Für den schulischen Einsatz dienen Cepheiden schließlich als weiteres Anwendungsszenario für das Entfernungsmodul.

Die ersten beiden Cepheiden wurden 1784 von zwei Pionieren der Astronomie, E. Pigott und J. Goodricke, bei der systematischen Beobachtung entdeckt. Dies waren  $\eta$  Aquilae und  $\delta$  Cephei. Sie stellten fest, dass diese Sterne ihre Helligkeit periodisch ändern. Der Stern  $\delta$  Cephei diente schließlich als Prototyp und Namensgeber der Sternklasse der veränderlichen Sterne. Die Ursache für die Veränderung der Helligkeit konnte A. A. Belopol'skii 1894 auf eine periodische Veränderung der Radialgeschwindigkeit der Cepheiden zurückführen. Hierzu konnte er spektroskopisch eine Verschiebung der Spektrallinien feststellen. 1899 konnte K. Schwarzschild dann ermitteln, dass die Helligkeitsänderung der Cepheiden zudem auf eine Variabilität der Oberflächentemperatur der Sterne hinweist. Dies war eine Bestätigung der Hypothesen zur Cepheiden-Pulsation von Ritter (1879) und später von Umov, Plummer und Shapley (1914).

Heute ist bekannt, dass die Klasse der Cepheiden in zwei Kategorien unterteilt werden kann: in Typ I, die klassischen Cepheiden, und in Typ II-Cepheiden. Typ-I-Cepheiden sind junge Population-I-Sterne. Typ II-Cepheiden (z. B. W Virginis) sind hingegen alte Sterne (Population II), die zu einem bestimmten Zeitpunkt an sich weniger leuchtstark und weniger massereich ( $\sim 0,5 M_{\odot}$ ) sind als die klassischen Cepheiden (Freedman & Madore, 1990; Wallerstein, 2002). Beide Arten von Cepheiden zeigen deutliche Perioden-Leuchtkraft-Beziehungen und unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre unterschiedliche Metallizität (Freedman & Madore, 1990). Für den schulischen Anwendungsbereich reicht die

Betrachtung der Typ-I-Cepheiden aus. Daher wird im Folgenden auch nur dieser Typ näher betrachtet.

Cepheiden sind Überriesen mit einer 500- bis 100.000-fach höheren Leuchtkraft als die Sonne, wobei deren Oberflächentemperatur mit etwa 6000 K der Sonne sehr ähnlich ist (D. G. Turner, 2010). Das Alter der Cepheiden liegt damit zwischen wenigen Millionen Jahren und etwa 600 Millionen Jahren und ihre Massen liegen somit zwischen drei und 20 Sonnenmassen (D. G. Turner, 1996). Cepheiden erfahren regelmäßige radiale Pulsationen mit einer Periodendauer zwischen etwa einem und 200 Tagen. Cepheiden sind leicht an ihrer charakteristischen Lichtkurve zu erkennen, die in Abbildung 31 dargestellt ist. Die Helligkeitsänderung ist dabei durch einen schnellen Anstieg auf die maximale Helligkeit gekennzeichnet, auf den ein langsamer Abfall auf ihr Minimum folgt. Diese Helligkeitsschwankung wiederholt sich nun periodisch.

Die physikalischen Hintergründe, die zu dieser Pulsation führen, sind sehr komplex und noch nicht vollständig bekannt.

Ein möglicher Effekt, der als Ursache für die Pulsation vermutet wird, ist eine Schwingung um eine Ionisationsgrenze. Wird ein Gas komprimiert, so steigt dessen Temperatur und kann dadurch vermehrt Energie abstrahlen. Liegt die vom Gas abgegebene em-Strahlung in einem Bereich nahe der Ionisationsgrenze eines im Gas häufig vorkommenden Elements (He), so kann die abgegebene Strahlung von den Atomen absorbiert werden und nicht aus dem Stern entweichen (Buchler, 2009). Dadurch steigt der nach außen gerichtete Strahlungsdruck. Buchler (1997) fasst in seinem Review über die Physik der klassischen Cepheiden zusammen, dass sich der Stern in einem hydrostatischen Gleichgewicht befindet und es somit durch den gestiegenen Strahlungsdruck zu einer sehr schnellen Ausdehnung des Sterns kommt. Diese bewirkt einen Abfall der Dichte und der

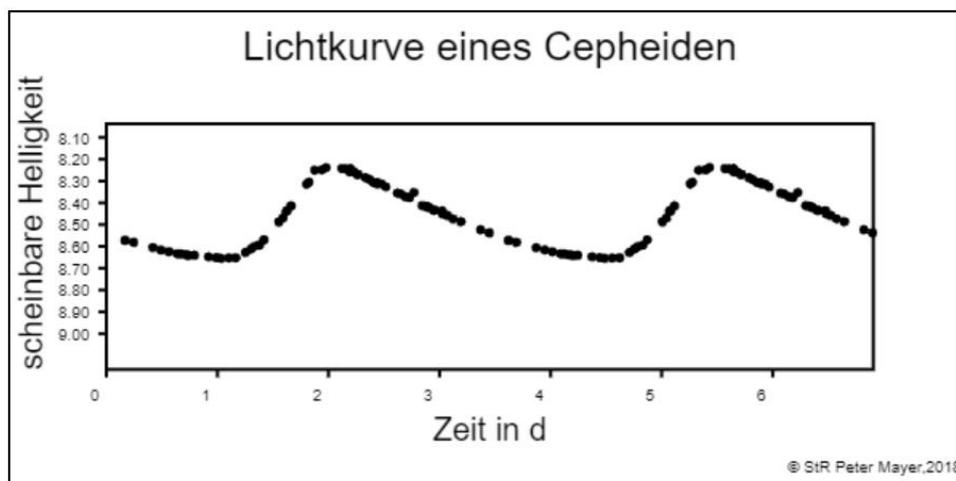


Abbildung 31: Lichtkurve eines Delta-Cepheiden (eigene Darstellung erstellt aus den online Daten der Gaia-Mission; Gaia Collaboration et al., 2018)

Temperatur, was wiederum dazu führt, dass die Atome wieder rekombinieren können und die abgestrahlte Energie den Stern verlassen kann. Dadurch sinkt der Strahlungsdruck, was in einem Überwiegen des Gravitationsdrucks und in einer Kontraktion des Sterns resultiert. Durch diese steigen die Temperatur und die Dichte des Sterns erneut an, bis die Energie des Gases wieder die Ionisationsgrenze erreicht hat und ein neuer Zyklus beginnt. Heute wird davon ausgegangen, dass die Ionisationsgrenze, um die diese Schwingung stattfindet, jene von  $He^+ \rightleftharpoons He^{++}$  ist (z.B. Buchler, 2009). Als ein weiterer möglicher Einfluss auf die Pulsation gilt hier der  $H \rightleftharpoons H^+$ -Übergang.

Die Pulsdauer lässt sich dabei mit Hilfe eines auf Eddington basierenden Schallwellenmodells abschätzen (Christy, 1968). Mit diesem Modell kann zwar die radiale Bewegung (Expansion und Kontraktion) erfasst werden, die Ionisationsübergänge werden allerdings vernachlässigt.

Die grundlegende Annahme dieses Modells besteht darin, dass die radialen Oszillationen aus der Resonanz von Schallwellen im Inneren der Sternatmosphäre entstehen. Die Schallwelle wird dabei jeweils an der Sternoberfläche reflektiert. Damit ergibt sich für die Periodendauer in der Grundschiwingung des Sterns:

$$\Pi \sim R^{\frac{3}{2}} \quad (5.14)$$

Aus dem Stefan-Boltzmann-Gesetz folgt  $L \sim R^2$ . Damit lässt sich die Periode der Grundschiwingung schreiben als:

$$\Pi \sim L^{\frac{3}{4}} \quad (5.15)$$

Zusammen mit dem Entfernungsmodul ergibt sich somit:

$$M \sim -2,5^m \lg(L) \quad (5.16)$$

$$M \sim -2,5^m \cdot \lg\left(\Pi^{\frac{4}{3}}\right) \quad (5.17)$$

$$M \sim -3,3^m \cdot \log(\Pi) \quad (5.18)$$

Diese Abschätzung stimmt ziemlich genau mit den Daten, die aus der Beobachtung von Cepheiden ermittelt wurden, überein:

$$M \approx -2,99^m \cdot \lg(\Pi) - 1,37^m \quad (5.19)$$

(Gieren et al., 1993)

$$M \approx -2,81^m \cdot \lg(\Pi) - 1,43^m \quad (5.20)$$

(Luri et al., 1998)

Diese Beziehung setzt die Pulsationsdauer  $\Pi$  des Cepheiden mit seiner absoluten Helligkeit in Verbindung. Ist also  $\Pi$  ermittelbar, kann mit Hilfe des

Entfernungsmoduls auch die Entfernung des Cepheiden von der Erde errechnet werden.

#### 5.4.3.2 Technische Umsetzung und Auswahl der Daten

Schüler sollen im Rahmen der Abiturvorbereitung mit Hilfe von Cepheiden Entfernungen bestimmen können. Hierzu ist jedoch keine mathematische Herleitung obiger Zusammenhänge nötig.

Wie bereits im vorherigen Abschnitt, das HRD von Sternhaufen betreffend, wurden auch hier Messdaten aus der Gaia-Mission der ESA verwendet, um zum einen die Perioden-Helligkeitsbeziehung zu veranschaulichen und zum anderen die Lichtkurven verschiedener  $\delta$ -Cepheiden zu untersuchen.

Die Messdaten wurden ebenfalls aus der zentralen Gaia-Datenbank abgerufen. Dabei wurde folgende Query verwendet:

```
SELECT * FROM gaiadr2.vari_cepheid c
INNER JOIN gaiadr2.gaiadr2_source s on s.source_id=c.source_id
WHERE type_best_classification='DCEP'
AND c.pf>0
AND phot_g_mean_flux_over_error > 50
AND phot_rp_mean_flux_over_error > 20
AND phot_bp_mean_flux_over_error > 20
AND phot_bp_rp_excess_factor < 1.3 + 0.06 * bp_rp * bp_rp
AND phot_bp_rp_excess_factor > 1.0 + 0.015 * bp_rp * bp_rp
ORDER BY num_clean_epochs_g DESC
```

Anschließend wurden die Daten nach geringen Messfehlern des Strahlungsflusses in den verschiedenen Bändern gefiltert. Auf Basis der Empfehlung des Gaia-Konsortiums soll der *excess\_factor*, der die Größe des systematischen Beobachtungsfehlers beschreibt, innerhalb eines Korridors liegen, der mit der Helligkeit im BP- und RP-Band zusammenhängt (vgl. Gaia Collaboration et al., 2018).

Durch diese Abfrage kam es zu 3133 Treffern. Diese wurden schließlich in TOPCAT nach den  $\delta$ -Cepheiden gefiltert, die in der Magellanschen Wolke liegen, da so aus den scheinbaren Helligkeiten der  $\delta$ -Cepheiden, unter der Annahme, dass alle  $\delta$ -Cepheiden der Magellanschen Wolke in etwa gleich weit entfernt sind, die absolute Helligkeit der  $\delta$ -Cepheiden leichter bestimmt werden kann. Da die Entfernung der Großen Magellanschen Wolke auf etwa 2 % genau bekannt ist, dient dieses Vorgehen zur Eichung des gesamten Verfahrens zur Ermittlung von

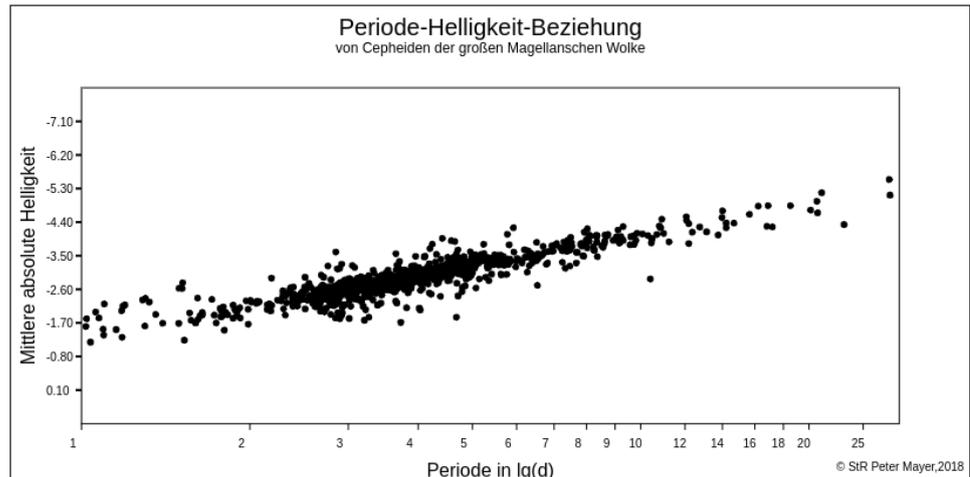


Abbildung 33: Periode-Helligkeits-Beziehung

1000 Cepheiden der Großen Magellanschen Wolke sind auf einer logarithmischen Periodenskala und einer ebenfalls logarithmischen Absoluten-Helligkeitsskala angetragen. Durch die Messpunkte lässt sich eine Ausgleichsgerade legen, die die Gleichung (5.19) beschreibt. (eigene Darstellung erstellt aus den online Daten der Gaia-Mission; Gaia Collaboration et al., 2018)

Entfernungen mit  $\delta$ -Cepheiden und somit als Ankerpunkt der kosmischen Entfernungsskala (vgl. Pietrzyński et al., 2013).

### 5.4.3.3 Beispielaufgabe

In Abbildung 33 sind die absoluten Helligkeiten von 1000  $\delta$ -Cepheiden der Großen Magellanschen Wolke über einer logarithmischen Perioden-Skala angetragen. Durch die Messwerte kann eine Ausgleichsgerade, die von Gleichung (5.19) beschrieben wird, gelegt werden. Schülerinnen und Schüler können diese Ausgleichsgerade, wie in Abbildung 32 gezeigt, selbst in das Diagramm

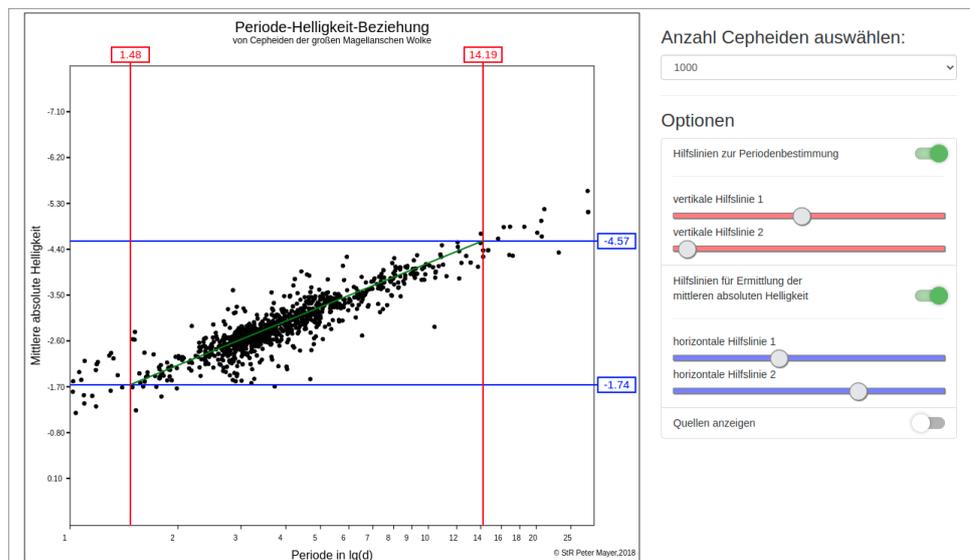
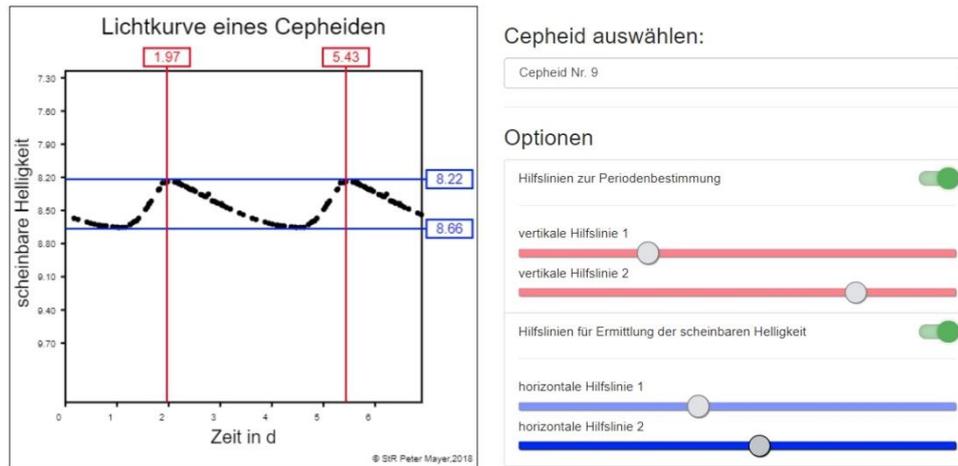


Abbildung 32: Webapplikation zur Ermittlung der Gleichung der Ausgleichsgeraden in der Periode-Helligkeits-Beziehung von  $\delta$ -Cepheiden (eigene Darstellung erstellt aus den online Daten der Gaia-Mission; Gaia Collaboration et al., 2018)



**Abbildung 34: Webapplikation zur Ermittlung der Periodendauer und der mittleren, scheinbaren Helligkeit des  $\delta$ -Cepheiden (eigene Darstellung erstellt aus den online Daten der Gaia-Mission; Gaia Collaboration et al., 2018)**

einzeichnen und so einen ungefähren Wert für die Gleichung der Ausgleichsgeraden ermitteln:

$$\bar{M} = a \cdot \lg\left(\frac{P}{d}\right) + b \quad (5.21)$$

$$a = \frac{\Delta\bar{M}}{\lg\left(\frac{P_2}{d}\right) - \lg\left(\frac{P_1}{d}\right)} = \frac{-2,83^m}{\lg(14,19) - \lg(1,48)} = -2,88^m \quad (5.22)$$

$$\Rightarrow b = -1,74 - (-2,88^m) \cdot \lg\left(\frac{1,48d}{d}\right) = -1,25^m \quad (5.23)$$

$$\bar{M} = -2,88^m \cdot \lg\left(\frac{t}{d}\right) - 1,25^m \quad (5.24)$$

Die sich daraus ergebenden Geradenparameter stimmen gut mit den theoretischen und experimentell ermittelten Parametern der Gerade überein (vgl. Gieren et al., 1993; Luri et al., 1998).

Für sehr viele  $\delta$ -Cepheiden wurde von Gaia eine Lichtkurve ermittelt. Für Schülerinnen und Schüler wurden hiervon zehn Lichtkurven ausgewählt und so aufbereitet, dass die Schülerinnen und Schüler mit Hilfe von Hilfslinien die Periodendauer und die mittlere scheinbare Helligkeit der Cepheiden bestimmen können.

Tabelle 2: In der Applikation zur Verfügung stehende Cepheiden mit Entfernung und mittleren absoluten Helligkeit (Gaia Collaboration et al., 2018)

Nr.	Entfernung	Mittlere Abs. Helligkeit	Source ID
1	1976,7 pc	14,397642 mag	5445181463681063936
2	1626,1 pc	14,381862 mag	1858213722264871040
3	1114,7 pc	13,5709515 mag	5443039958626646400
4	2234,3 pc	15,816234 mag	1854297811606226432
5	2350,5 pc	15,453062 mag	3184429598120069120
6	1218,1 pc	11,207565 mag	484232278156390656
7	1293,4 pc	13,82990675 mag	3026471318138219392
8	1750,5 pc	15,4287945 mag	1909176567246861440
9	1829,8 pc	9,766011 mag	5932997939411720960
10	2498,6 pc	8,917471 mag	5884729035255064064

Mit Hilfe der obigen Gleichung ergibt sich für Cepheid Nr. 9 (vgl. Abbildung 34) eine mittlere absolute Helligkeit  $\bar{M}$ :

$$\begin{aligned} \bar{M} &= -2,88^m \cdot \lg\left(\frac{5,43d - 1,99d}{d}\right) - 1,25^m & (5.25) \\ &= -2,80^m \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich nun eine Entfernung von:

$$r = 10pc \cdot 10^{\frac{|8,44^m + 2,80^m|}{5}} = 1770pc \quad (5.26)$$

Auch dies stimmt mit dem Literaturwert (1830 pc) sehr gut überein (Abweichung lediglich  $\approx 3.3\%$ ) (SourceID: 5932997939411720960; Gaia Collaboration et al., 2018).

Werden beide Webapplikationen zusammengebracht, so können die Schülerinnen und Schüler mit Hilfe der Diagramme die Entfernung des jeweiligen Cepheiden ermitteln.

Zudem erkennen die Schülerinnen und Schüler durch die Verwendung von Original-Messwerten, die im Diagramm zum Teil anders liegen als erwartet, dass die Entfernungsbestimmung ein schwieriger und mit teils großen Fehlern behafteter Vorgang ist. Denn obwohl beispielsweise die einzelnen Cepheiden ziemlich gut auf einer Geraden im Periode-Helligkeits-Diagramm liegen, weist der Verlauf eine gewisse Breite auf, die zunächst zu einer unscharfen Bestimmung der Geradenparameter und damit der mittleren absoluten Helligkeit führt. Dies zieht wiederum eine unscharfe Bestimmung der Distanz nach sich. Deshalb bietet es sich an dieser Stelle an, wegen der interaktiven Elemente der Darstellung auf anschauliche Art und Weise in eine Fehlerdiskussion einzusteigen und somit zum

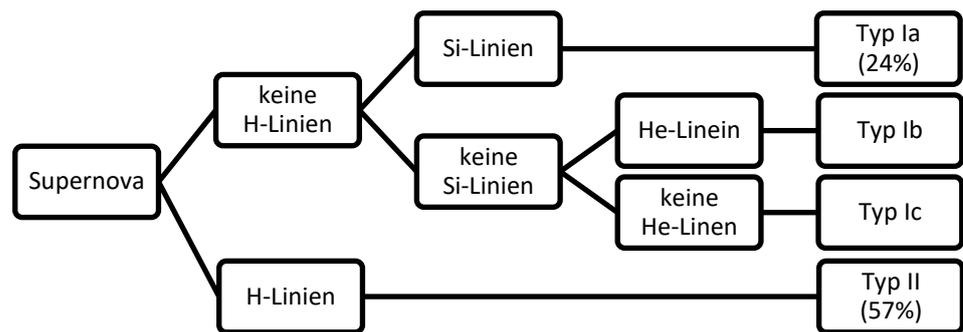
einen oben genannte Problemstellen durch die Schülerinnen und Schüler selbst erörtern zu lassen und zum anderen darauf aufbauend beispielsweise einen Entfernungskorridor ermitteln zu lassen, innerhalb dessen der Stern mit einer hohen Wahrscheinlichkeit liegen wird. Diese Fehlerbetrachtung beim Experimentieren ist ein integraler Bestandteil der Experimentierkompetenz in den Naturwissenschaften (z. B. Derkse, 1981; Hilfert-Rüppell et al., 2018) und sollte, wo immer möglich, thematisiert werden.

### **5.4.4 Supernovae vom Typ Ia**

Ein weiteres Anwendungsszenario für das Entfernungsmodul ist die Entfernungsbestimmung mittels Supernovae vom Typ Ia. Hierfür werden im Folgenden zunächst die verschiedenen Typen von Supernovae diskutiert (Abschnitt 5.4.4.1.1 bzw. 5.4.4.1.2), bevor im Anschluss ein Augenmerk auf die Identifikation des Supernovatypos mit Hilfe von Spektren und Lichtkurven, die Entfernungsbestimmung sowie die Ermittlung von Explosions-/Auswurfgeschwindigkeiten gelegt wird. Neben dem Kernanliegen, der Entfernungsbestimmung, ist im schulischen Kontext auch die Tatsache interessant, dass mit Hilfe von Supernovae vom Typ Ia Beweise für die beschleunigte Ausdehnung des Universums erbracht werden konnten (Perlmutter et al., 1999; Riess et al., 1998). Dafür erhielten Riess, Perlmutter und Schmidt 2011 den Nobelpreis der Physik.

#### **5.4.4.1 Grundlagen der Entfernungsbestimmung mit Supernovae Ia**

Supernovae werden zunächst auf der Grundlage ihrer Beobachtungsdaten klassifiziert. Nach Li, Leaman et al. (2011) werden Supernovae heute im Wesentlichen in vier Hauptklassen unterschieden: Typ Ia, Typ Ib, Typ Ic und Typ II. Die unterschiedlichen Typen lassen sich durch das Auftreten oder das



**Abbildung 35: Vereinfachte Klassifizierung der Hauptklassen von Supernovae nach Li, Leaman et al. (2011).** Da sich die Spektren einer Supernova im Laufe der Zeit verändern, werden für die Klassifizierung die Spektren während des Helligkeitsmaximums verwendet. (eigene Darstellung nach )

Nichtauftreten bestimmter Linien im Spektrum identifizieren. Demnach ergibt sich die vereinfachte Klassifizierung von Supernovae, die in Abbildung 35 dargestellt ist.

Neben den Hauptklassen sind bereits weitere Unterklassen identifiziert worden (vgl. Branch & Wheeler, 2017), wie beispielsweise Supernovae vom Typ Iax (Li et al. 2003, Foley et al. 2013) und Supernovae vom Typ IIn (Schlegel 1990, Wegner und Swanson 1996).

Im Folgenden wird der Blick zunächst auf die Supernovae vom Typ Ia gerichtet – insbesondere auch deshalb, weil dieser Typ der im schulischen Kontext relevanteste ist. Im Anschluss daran folgen die Kernkollapssupernovae vom Typ Ib, Ic und II.

### 5.4.4.1.1 Supernovae vom Typ Ia

Supernovae vom Typ Ia kommen in unserer Milchstraße durchschnittlich weniger als ein Mal pro Jahrhundert vor. Beispielsweise bestimmten Li, Chornock et al. (2011) für die Milchstraße eine Auftretenshäufigkeit von  $0,54 \pm 0,12$  pro Jahrhundert. Dabei fand die letzte Supernova Ia, die direkt beobachtet werden konnte, bereits im Jahr 1604 statt. Dies ist ein Grund dafür, dass bis heute noch kein Vorläufer einer Supernova vom Typ Ia direkt beobachtet wurde, woraus folgt, dass nur wenige konkrete Details über diese bekannt sind. Lediglich McCully et al. (2014) behaupten, einen Vorläufer einer Supernova Iax, einer Unterklasse der Supernovae vom Typ Ia, gefunden zu haben: ein weißer Zwerg, der Materie von einem He-Stern akkreditiert.

Aus den zahlreichen Beobachtungen von Supernovae Ia können jedoch Bedingungen abgeleitet werden, die ein Vorläuferkandidat einer Supernova Ia erfüllen muss:

- (1) Der Radius des Objekts muss kleiner oder gleich  $0,02 R_{\odot}$  sein (Bloom et al., 2012).
- (2) Die Dichte des Objekts muss mindestens  $10^4 - 10^7 \frac{g}{cm^3}$  betragen (Hillebrandt & Niemeyer, 2000).
- (3) Die Auswurfgeschwindigkeiten müssen in der Größenordnung von  $10^4 \frac{km}{s}$  liegen (Hillebrandt & Niemeyer, 2000).
- (4) Die Explosion des Vorläufersterns muss die beobachteten Mengen an  $^{56}Ni$  und Elemente mittlerer Masse hervorbringen ( $0,5 - 0,6 M_{\odot}$ ) (Nomoto, 1984; Stritzinger & Leibundgut, 2005).
- (5) Die Abwesenheit von Wasserstofflinien in den Spektren deutet zudem darauf hin, dass die anfängliche H-Masse im Vorgängerstern unterhalb von  $0,1 M_{\odot}$  liegt (Hillebrandt & Niemeyer, 2000).

All diese Bedingungen legen den Schluss nahe, dass ein kompaktes Objekt wie ein weißer Zwerg oder ein Neutronenstern der Vorläufer einer Supernova Ia sein muss. Da aber Neutronensterne das Produkt einer Supernova vom Typ II sind (Lattimer & Prakash, 2004), bleiben mit hoher Wahrscheinlichkeit nur noch weiße Zwerge als Vorläufer einer Supernova vom Typ Ia übrig (Hoyle & Fowler, 1960). Dabei kommen verschiedene Typen von weißen Zwergen vor, die anhand ihrer Zusammensetzung (z. B. He, CO oder auch O-Ne(Mg)) unterschieden werden können. Diese werden in der aktuellen Forschung intensiv untersucht (vgl. Stéphane Blondin et al., 2017; Fink et al., 2007; Fink et al., 2010; Gronow et al., 2020; S.-C. Leung & Nomoto, 2020; Livne, 1990; Nomoto, 1982a, 1982b; Shigeyama et al., 1992; Webbink, 1984; Whelan & Iben Jr, 1973). Alle Typen haben jedoch eines gemeinsam: Sie müssen sich in einem engen Doppelsternsystem befinden, sodass z. B. Masse vom Partner auf den weißen Zwerg überströmen kann.

Am masseärmsten sind weiße Zwerge aus Helium. Ihre Masse beträgt im Allgemeinen weniger als  $0,45 M_{\odot}$ . Akkreditieren solche weißen Zwerge Materie, zündet ab einer Grenzmasse von ca.  $0,7 M_{\odot}$  die Heliumfusion, was schließlich zu einer Explosion führt (Livio & Mazzali, 2018). Die Auswurfmaterie würde jedoch fast ausschließlich aus Helium und  $^{56}Ni$  sowie dessen Zerfallsprodukten bestehen (Nomoto, 1984; Nomoto & Sugimoto, 1977; Woosley, S. E., Taam, R. E., & Weaver, T. A., 1986). Diese Zusammensetzung der Auswurfmaterie stimmt gleichwohl nicht mit den Beobachtungen von Supernovae vom Typ Ia überein. Wie bereits beschrieben, zeichnen sich Supernovae vom Typ Ia durch das Fehlen von He in ihren Spektren aus (z. B. Li, Leaman et al., 2011). Daraus lässt sich schließen, dass die Mehrheit der Supernovae vom Typ Ia mit Sicherheit nicht von explodierenden weißen Zwergen aus Helium erzeugt wird.

Durch den Massetransfer in einem Doppelsternsystem kann die eigentliche Maximalmasse von  $8M_{\odot}$ , bei der sich noch ein weißer Zwerg bilden kann, leicht überschritten werden (z. B. Iben Jr & Tutukov, 1985; Ritossa et al., 1996).

Am massereichsten sind weiße Zwerge aus O-Ne. Heute wird davon ausgegangen, dass sich diese in einem Doppelsternsystem bilden, bei dem die beiden Partner ursprünglich jeweils eine Masse von etwa  $10 M_{\odot}$  besitzen. Simulationen deuten darauf hin, dass derartige weiße Zwerge jedoch eher zur Bildung eines Neutronensterns als zu einer Explosion führen (Gutierrez et al., 1996; Nomoto & Kondo, 1991; Saio & Nomoto, 1985, 2004; Sato et al., 2015); somit würden sie als mögliche Vorläufer für eine Supernova vom Typ Ia ausscheiden. Diese auf Simulationen basierende Vermutung wird durch die speziellen Konstellationen, die zu ihrer Entstehung führen, gestützt. Denn diese macht es sehr unwahrscheinlich, dass weiße Zwerge aus O-Ne häufig genug vorkommen, um die beobachtete Supernova-Ia-Rate hervorzurufen (z. B. Livio & Truran, 1992).

Damit bleibt als wahrscheinlichster Vorläufer einer Supernova vom Typ Ia, ein CO-Weißer-Zwerg, übrig. Diese Vermutung wird nicht nur durch zahlreiche Simulationen gestützt (Hillman et al., 2016; Nomoto et al., 2007; Nomoto & Kondo, 1991), sondern auch durch spektroskopische Beobachtungen einer großen Anzahl von Supernovae vom Typ Ia. Darunter fallen  $^{56}\text{Co}$ -Linien (Churazov et al., 2014), Linien von Elementen der Eisen-Gruppe (Mazzali et al., 2007), aber auch Hochgeschwindigkeitslinien von unfusioniertem Kohlenstoff und Sauerstoff (S. Blondin et al., 2012; Nugent et al., 2011).

Normalerweise würden weiße Zwerge über Jahrmilliarden hinweg langsam ihre Energie abstrahlen und dabei auskühlen. Nur in einem engen Doppelsternsystem kann ein weißer Zwerg mit seinem Begleiter wechselwirken und so Masse gewinnen. Dieses Doppelsternsystem kann beispielsweise aus einem weißen Zwerg und einem roten Riesen (einfach entartet; z. B. Dave et al., 2017; Iben Jr et al., 1987; Whelan & Iben Jr, 1973) oder aus zwei weißen Zwergen (doppelt entartet; z. B. Rebassa-Mansergas et al., 2019; Tanikawa et al., 2018; Webbink, 1984; Whelan & Iben Jr, 1973) bestehen.

Bis heute existiert kein allgemein gültiges Modell zum konkreten Ablauf einer Supernova Ia. Es haben sich vielmehr verschiedene Modelle herausgebildet, die jeweils Vor- und Nachteile besitzen:

Beispielsweise zeichnet sich aktuell ab, dass das klassische Modell (ein weißer Zwerg aggregiert solange Masse, bis er die Chandrasekhar-Grenzmasse erreicht und durch eine schlagartig einsetzende Kohlenstofffusion explodiert) weitaus seltener auftritt als bisher gedacht (Eitner et al., 2020; Kirby et al., 2019; S.-C. Leung & Nomoto, 2020). Denn Eitner et al. (2020) behaupten, dass Sub-Chandrasekhar-Supernovae Ia mindestens 75 % aller Supernovae ausmachen würden. Aus diesem Grund wird im Folgenden lediglich die Sub-Chandrasekhar-Supernova Ia detaillierter betrachtet:

Im Gegensatz zu Supernovae Ia, die an der Chandrasekhar-Grenze stattfinden, haben Sub-Chandrasekhar-Supernovae Ia keine festgelegte Gesamtmasse. Im Allgemeinen wird für Sub-Chandrasekhar weiße Zwerge eine Gesamtmasse zwischen  $0,97M_{\odot}$  und  $1,15M_{\odot}$  angenommen (Sim et al., 2010). Dabei stimmt die erwartete absolute Helligkeit der Supernova mit den beobachteten Helligkeiten überein. Sim et al. (2010) stellen zudem fest, dass Explosionen von weißen Zwergen unterhalb der Chandrasekhar-Masse gut mit der Breite-Leuchtkraft-Relation (engl. *Width-Luminosity Relation*) übereinstimmen (vgl. Stéphane Blondin et al., 2017; D. Kasen et al., 2009; Shen et al., 2018). Die Häufigkeiten und die Messgrößen von Sub-Chandrasekhar-Supernovae werden durch die Gesamtmasse des weißen Zwergs (Fink et al., 2010), den Kohlenstoff-Massenanteil (Ohlmann et al., 2014) und andere Parameter beeinflusst.

Ein weißer Zwerg unterhalb der Chandrasekhar-Masse kann mit seinem Begleiter auf unterschiedliche Weise wechselwirken, um schließlich eine thermonukleare Explosion herbeizuführen. In der Literatur werden im Wesentlichen zwei Explosionsmechanismen diskutiert:

1. Violent-Merger und
2. Double-Detonation.

Bei einer **Violent-Merger-Explosion** befinden sich zunächst zwei weiße Zwerge, die für sich genommen jeweils unterhalb der Chandrasekhar-Masse liegen ( $0,83 M_{\odot}$  und  $0,9 M_{\odot}$ ), in einem engen Doppelsternsystem. Kommen sich diese beiden weißen Zwerge näher, können sie verschmelzen und so eine Explosion auslösen (z. B. Pakmor et al., 2011). Liu et al. (2018) schätzen, dass Violent-Merger-Explosionen einen Anteil von 16 % an allen Supernovae Ia haben.

Bei einer **Double-Detonation** befindet sich der weiße Zwerg in einem Doppelsternsystem mit einem He-Stern oder einem He-weißen Zwerg. Dabei kann Masse auf den CO-weißen Zwerg übergehen. Diese bildet dann zunächst eine He-Schicht auf der Oberfläche des CO-weißen Zwergs. Auf der Unterseite dieser Schale zündet schließlich eine He-Explosion, die auf thermale Instabilitäten zurückzuführen ist (Fink et al., 2007; Fink et al., 2010; Gronow et al., 2020).

In beiden Fällen werden während der Explosion die Elemente des weißen Zwerges bis zur Eisen-Gruppe und zu Elementen mit mittlerer Masse fusioniert (Review: Röpke et al., 2011). Dabei entstehen große Mengen ( $0,3 - 0,9 M_{\odot}$ ) an  $^{56}Ni$ , die im Anschluss bis  $^{56}Fe$  zerfallen. Im Spektrum sind diese Linien im Röntgenbereich deutlich zu erkennen (Review: Röpke et al., 2011; Stritzinger & Leibundgut, 2005). Ferner erklärt dieser radioaktive Zerfall (Halbwertszeit von sechs Tagen ( $^{56}Ni$ ) und 77 Tagen ( $^{56}Co$ )), warum die Supernova vergleichsweise lange hell bleibt.

Denn beim Zerfall werden Gammastrahlung und Positronen freigesetzt, die die Auswurfmaterie (Ejekta) aufheizen und den Helligkeitsverlauf hervorrufen, der sich bei Supernovae vom Typ Ia nach dem Helligkeitsmaximum beobachten lässt (Colgate & McKee, 1969; Truran et al., 1967). Dabei erreichen im Allgemeinen die Lichtkurven von Supernovae vom Typ Ia im visuellen Band innerhalb von etwa zehn bis zwanzig Tagen ein Maximum. Danach nimmt die Helligkeit innerhalb weniger Tage um etwa drei Magnituden ab. Auf diese Phase folgt ein stetiger Rückgang der Helligkeit um ca. eine Magnitude pro 100 Tage (z. B. Shivvers et al., 2017).

Die roten und nahinfraroten Lichtkurven nach dem Lichtmaximum weisen einen zweiten Peak auf (Contreras et al., 2010; Elias et al., 1985; Elias & Frogel, 1981; Leibundgut, 2000; Wood-Vasey et al., 2008). Die Ursache hierfür ist eine Veränderung in der Ionisationsstruktur der ausgeworfenen Materie, bei der Elemente der Eisengruppe vom zweifach ionisierten Zustand zum einfach ionisierten Zustand übergehen (Rekombination). Die dabei freiwerdende Energie wird vorzugsweise im Infraroten abgegeben, was zu einem erneuten Anstieg der Helligkeit in diesem Wellenlängenbereich führt (Daniel Kasen, 2006). Dabei wird das zweite Maximum ( $t_2$ ) etwa 20 bis 30 Tage nach dem ersten Maximum erreicht. Der exakte Wert von  $t_2$  ist vom während der Explosion entstandenen  $^{56}\text{Ni}$  abhängig (Daniel Kasen, 2006).

Neben den Erkenntnissen, die sich aus der Photometrie ergeben, werden vor allem auch spektroskopische Untersuchungen einer Supernova durchgeführt, um beispielsweise deren Typ zu bestimmen. Hierzu werden Spektren zu unterschiedlichen Zeitpunkten vor, während und nach dem Zeitpunkt der maximalen Helligkeit benötigt:

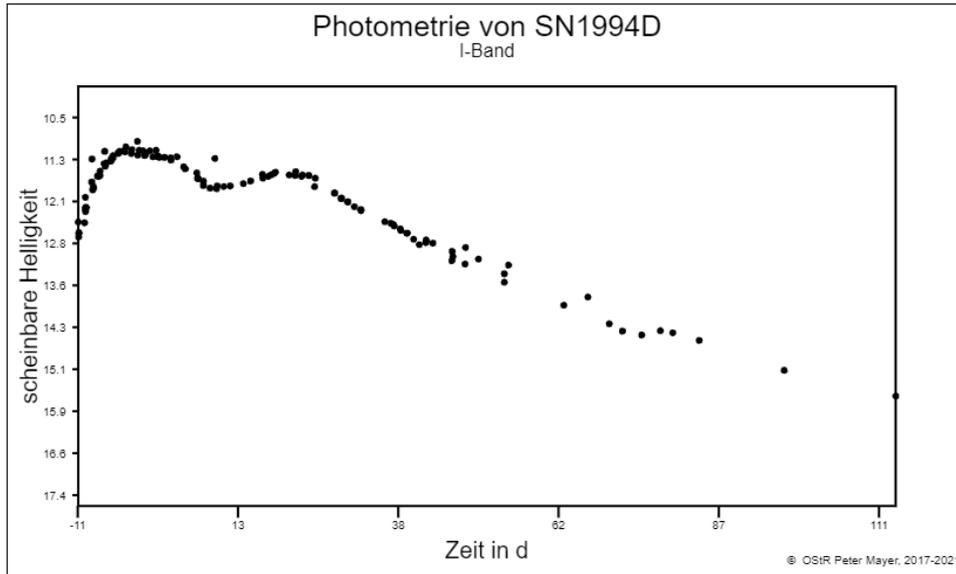


Abbildung 36: Die Lichtkurve im I-Band weist einen deutlichen zweiten Peak auf.

(Eigene Grafik auf Basis der Daten des Astrocats – Open Astronomy Catalog; detaillierte Quellenangaben können den Quellen in der Applikation entnommen werden, da diverse Datenquellen im Bild dynamisch zusammengefasst werden).

(i) Phase vor der maximalen Helligkeit

Die prämaximale Phase von Supernovae vom Typ Ia ist durch sehr hohe Dopplerverschiebungen der Spektrallinien von z. B. Silizium oder Calcium (in der Größenordnung von  $10 - 15.000 \frac{km}{s}$ ) gekennzeichnet. Das Ca-II-NIR-Triplett bei  $8498 \text{ \AA}$ ,  $8542 \text{ \AA}$  und  $8662 \text{ \AA}$  wird jedoch stark durch andere Merkmale verunreinigt, sodass es – insbesondere für Schüler – schwierig ist, Calcium eindeutig nachzuweisen.

Insgesamt deuten diese Hochgeschwindigkeitslinien darauf hin, dass die Photosphäre fast den gesamten Auswurf (Ejakta) überdeckt. Mit fortschreitender

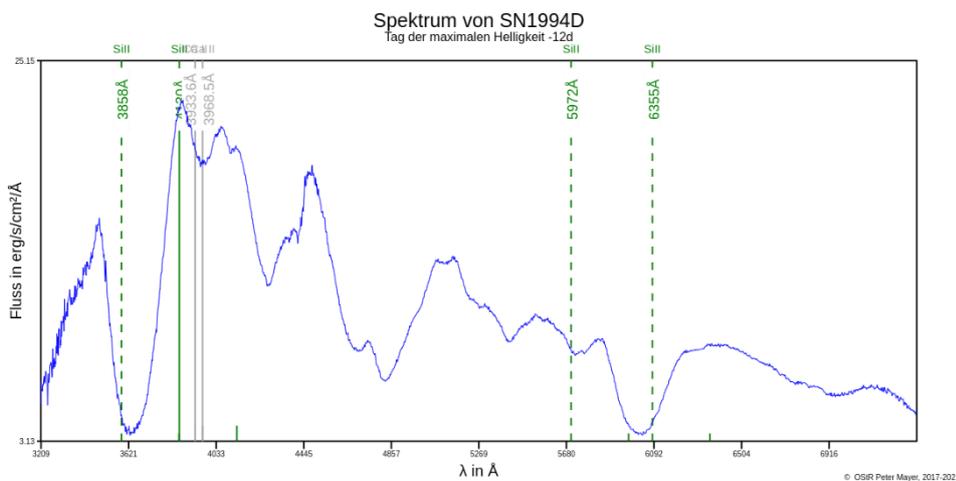


Abbildung 37: Es sind deutliche Silizium-Linien sowie Calcium-Linien erkennbar. Die Silizium-Linien sind zudem stark blauverschoben.

(Eigene Grafik auf Basis der Daten des Open-Supernova-Catalog; detaillierte Quellenangaben können den Referenzen der einzelnen Spektren entnommen werden).

Zeit nach dem Zeitpunkt der maximalen Helligkeit nehmen die Linienverschiebungen schließlich wieder ab (z. B. Childress et al., 2013; Mazzali et al., 2005). Das Spektrum wird zu diesem Zeitpunkt von P-Cygni-Profilen dominiert, die einen Emissionspeak bei der Ruhewellenlänge der Linie und eine zusätzliche blauverschobene Absorptionslinie aufweisen. P-Cygni-Profile sind für eine Vielzahl von Elementen mittlerer Masse (engl. *Intermediate-Mass-Elements*; IME) und Elemente der Eisen-Gruppe zu beobachten (z. B. Branch et al., 2004). Unfusionierte Elemente des Vorläufers, wie z. B. Kohlenstoff, können auch während der sehr frühen Phase in der Entwicklung einer thermonuklearen Supernova beobachtet werden (z. B. Nugent et al., 2011).

(ii) Phase der maximalen Helligkeit (Maximum Light)

Etwa zehn Tage nach der Explosion zieht sich die Photosphäre in eine Schicht zurück, die Elemente der Eisen-Gruppe enthält. Die Spektren aber werden immer noch von Elementen mittlerer Masse dominiert. Zu diesem Zeitpunkt sind die charakteristischen Merkmale einer Supernova vom Typ Ia sichtbar:

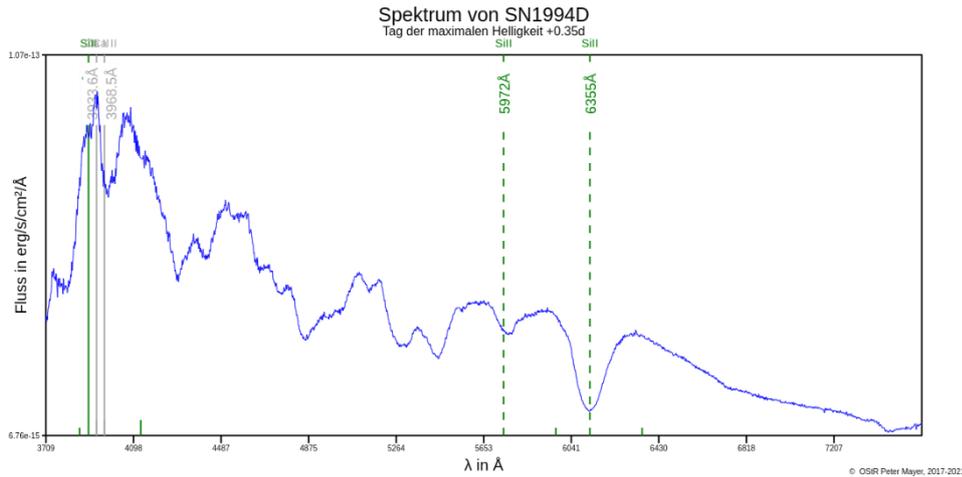
Dazu gehören markante Absorptionsmerkmale von

- Si II 6355 Å,
- Si II 5972 Å und
- Si II 4130 Å.

Geringe Mengen von Ca II führen zur Bildung starker Ca-II-Emissionslinien.

- Ca II 3933.66 Å (K-Linie)
- Ca II 3968,5 Å (H-Linie)

Um den Zeitpunkt der maximalen Helligkeit herum ist die Photosphäargeschwindigkeit auf  $8.000 - 15.000 \frac{km}{s}$  gesunken. In einigen Fällen sind zu diesem Zeitpunkt immer noch Hochgeschwindigkeitslinien zu sehen, deren Geschwindigkeiten jedoch mit weiter fortschreitender Zeit rapide abnehmen (z. B. Branch et al., 2004; Mazzali et al., 2005).

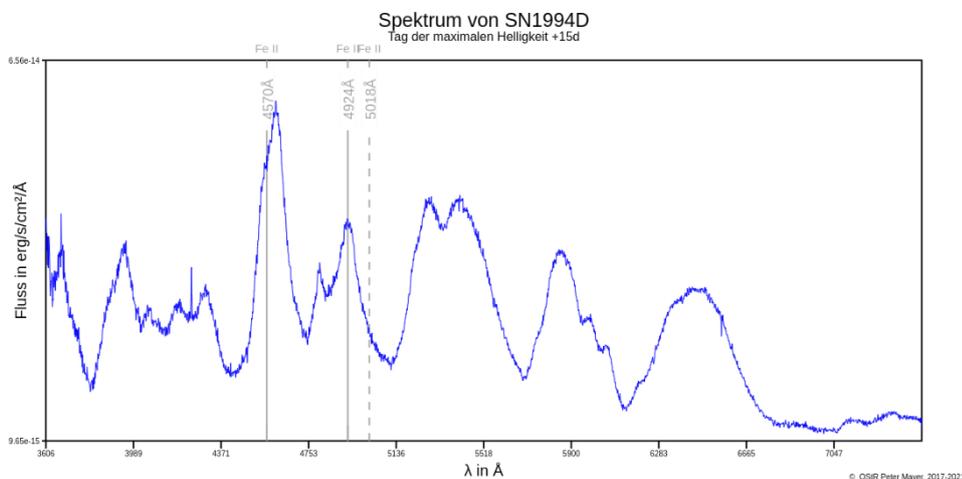


**Abbildung 38:** Die Silizium-Linien sind weiter deutlich erkennbar. Jedoch hat die Blauverschiebung deutlich abgenommen. Waren es zwölf Tage vor dem Zeitpunkt der maximalen Helligkeit noch etwa 271 Å, sind es nun nur noch 232 Å.

(Eigene Grafik auf Basis der Daten des Open-Supernova-Catalog; detaillierte Quellenangaben können den Referenzen der einzelnen Spektren entnommen werden)

(iii) Phase nach der maximalen Helligkeit

Nach dem Helligkeitsmaximum wird das Spektrum zunehmend von Elementen der Eisen-Gruppe geprägt. Einige Tage nach dem Maximum beginnen Fe-Linien aufzutreten, und innerhalb von zwei Wochen dominieren sie das Spektrum vollständig.



**Abbildung 39:** Eisen-Linien, die in der Zeit vor und um das Maximum Light nicht zu sehen waren, sind nun deutlich ausgeprägt. Die Blauverschiebung der Silizium-Linien nimmt weiter ab.

(Eigene Grafik auf Basis der Daten des Open-Supernova-Catalog; detaillierte Quellenangaben können den Referenzen der einzelnen Spektren entnommen werden.)

#### 5.4.4.1.2 Kernkollaps Supernovae

Supernovae vom Typ Ib, Ic und II stehen am Ende einer Lebensspanne eines massereichen Sterns, der durch die Eigengravitation kollabiert. Nach der Phase des Heliumbrennens durchlaufen massereiche Sterne ( $M > 8M_{\odot}$ ) weitere

Brennphasen, bei denen zunächst das Kohlenstoffbrennen und dann nacheinander Neon-, Sauerstoff- und Siliziumbrennen einsetzen. Jede dieser Brennphasen geht mit einer noch höheren Kerntemperatur einher, sodass auch immer schwerere Elemente fusioniert werden können. Dabei halten diese Brennphasen die Kontraktion des Kerns vorübergehend auf, da durch die freiwerdende Energie ein nach außen gerichteter Strahlungsdruck dem Gravitationsdruck entgegenwirkt.

Nach dem Siliziumbrennen beträgt die Temperatur im Kern etwa  $2,5 \cdot 10^9 K$ , sodass die auftretenden Photonen genug Energie besitzen, um schwere Kerne durch den Kernphotoeffekt (engl. *Photodesintegration*) zu zerstören, indem sie aus dem Target-Kern Bestandteile (p, n, He) herausschlagen (Kotake et al., 2006). Wie bei seinem Namensvetter, dem Photoeffekt, muss für diesen Prozess auch Energie aufgewendet werden. Dies bedeutet, dass dem Kern des Sterns somit thermische Energie entzogen wird, was zu einem Absinken der Temperatur und damit des Strahlungsdrucks führt. Zudem beginnen nun die Atomkerne, die freien Elektronen einzufangen (Rekombination), wodurch ein Absinken der Fermi-Energie hervorgerufen wird. Damit kann der Stern schnell kontrahieren, und zwar so lange, bis die abstoßende starke Kraft den Kontraktionsprozess im inneren Kern zum Stillstand bringt (Kotake et al., 2006).

Dadurch werden Schockwellen nach außen geschickt. Diese durchlaufen die weiter einfallende Materie des äußeren Eisen-Kerns und bewirken dort einen starken Temperaturanstieg. Die Folge ist, dass hinter der Schockwelle in den äußeren Kernbereichen der Kernphotoeffekt einsetzt, wodurch der Schockwelle Energie entzogen wird (Kotake et al., 2006). Ohne die beim Kernphotoeffekt und beim Elektroneneinfang freiwerdenden Neutrinos käme die Schockwelle komplett zum Stillstand. Da wegen der enormen Dichte des Kerns etwa 5 % der Energie der Neutrinos an die Kernmaterie zurückgegeben werden, kann die Schockwelle weiter durch die Kernmaterie laufen. Diese 5 % reichen aus, um eine Supernova auszulösen (Kotake et al., 2006).

Obwohl im Kern des Sterns bei Supernovae vom Typ Ib, Ic und II die identischen Prozesse ablaufen, können sie anhand ihrer Spektren unterschieden werden. Dies wird dadurch begründet, dass sich die sterbenden, massereichen Sterne in unterschiedlichen Stadien des Massenverlusts befinden, wenn bei ihnen das Siliziumbrennen einsetzt.

Dabei wurde bei einer Supernova vom Typ Ib bereits vor dem Siliziumbrennen die äußere Wasserstoffhülle des Sterns abgegeben (Kotake et al., 2006). Deshalb lassen sich im Spektrum dieser Art Supernova auch keine Wasserstofflinien erkennen.

Liegt hingegen eine Supernova vom Typ Ic vor, so wurde zusätzlich zur Wasserstoffschale auch die Heliumschale abgetragen (Kotake et al., 2006). Dadurch ist im Spektrum derartiger Supernovae auch keine große Menge an Helium nachweisbar.

Anders verhält es sich mit Supernovae vom Typ II. Hier sind beide Hüllen noch vorhanden (Kotake et al., 2006). Damit sind im Spektrum einer solchen Supernova auch deutliche Wasserstoff- und Heliumlinien erkennbar.

### 5.4.4.2 Technische Umsetzung und Auswahl der Daten

Schüler sollen im Rahmen der Abiturvorbereitung mit Hilfe von Supernovae vom Typ Ia die astronomische Entfernungsleiter erweitern und damit Entfernungen innerhalb des Universums bestimmen können.

Das Ziel dieser Übung besteht darin, dass Schüler aus aufbereiteten Messdaten zunächst eine Entscheidung bezüglich des Typs einer Supernova treffen, um dann ggf. eine Entfernungsbestimmung mittels des Entfernungsmoduls durchführen zu können.

Die verwendeten Messdaten stammen aus dem Open Supernovae Catalogue (<https://sne.space/>) und werden clientseitig per AJAX Request durch die API (v.1.0) des Open Astronomy Catalogue (<https://github.com/astrocatalogs/OACAPI>) abgerufen.

Um zunächst geeignete Kandidaten für die Schulanwendung zu identifizieren, wurden auf <https://sne.space/> einige Filtereinstellungen vorgenommen, indem folgende Optionen aktiviert wurden:

- Has pre-max photometry
- Has post-max photometry
- Has pre-max spectroscopy
- Has post-max spectroscopy

Beobachtungen einer großen Anzahl von Supernovae vom Typ Ia zeigen, dass die maximale Helligkeit im optischen Bereich nicht einheitlich ist. Diese kann durch eine Reihe von Kalibrierungsverfahren normalisiert werden, insbesondere durch die Korrelation zwischen der Form der Lichtkurve und der maximalen Helligkeit sowie zwischen dem Beobachtungsband der Lichtkurve und der maximalen Helligkeit (z. B. Guy et al., 2010; Jha et al., 2007; Riess et al., 1996; Riess et al., 2007). Da die Aufbereitung der Daten mittels Javascript auf dem Rechner der Nutzer erfolgt, werden lediglich diejenigen Daten ausgewählt, die bereits kalibriert sind. Hierzu wird der entsprechende Filter aktiviert.

Insgesamt reduzierte sich durch diese Maßnahmen die Anzahl der möglichen Supernovae von 88.138 auf 601.

Um Schüler nicht zu überfordern bzw. zu verwirren, bietet es sich an, für die jeweiligen Supernovae typische Fälle zu verwenden und etwaige Sonderfälle auszuklammern. Daher wurden aus den vorliegenden 601 Kandidaten jene herausgefiltert, die eine eindeutige Zuordnung ermöglichen. Die folgenden Kriterien wurden hierfür festgelegt:

- Eine absolute Helligkeit im Bereich  $-19,3^m \pm 0,1^m$
- Für die Photometrie liegt im V-Band und, wenn möglich, ebenfalls im I-Band eine ausreichende Anzahl an Beobachtungszeitpunkten vor.

Daraus resultieren 22 mögliche Supernovae vom Typ Ia, die in die Applikation eingebunden wurden:

**Tabelle 3: Übersicht der in der Applikation enthaltenen Supernovae vom Typ Ia. Die Daten entstammen aus einer sehr hohen Zahl von Quellen, die in der Applikation abrufbar sind.**

Name	Mmax [mag]	Type	# Phot.	# Spec.
SN1994D	-19.32	Ia	590	76
SN1994S	-19.2	Ia	37	6
SN1997by	-19.2	Ia	38	3
SN1999cc	-19.27	Ia	79	7
SN2004at	-19.354	Ia	97	11
SN2005ao	-19.4	Ia	28	5
SN2005hc	-19.23	Ia	498	8
SN2005ms	-19.4	Ia	51	2
SN2006S	-19.37	Ia	74	21
SN2006ax	-19.4	Ia	343	15
SN2006ej	-19.3	Ia	225	8
SN2006pr	-19.234	Ia	24	3
SN2007F	-19.38	Ia	147	17
SNF20080522-011	-19.327	Ia	87	11
SN2008hj	-19.244	Ia	19	3
SN2009jb	-19.33	Ia	57	10
PTF10ndc	-19.36	Ia	44	3
PTF10wnm	-19.22	Ia	23	5
LSQ12fxd	-19.4	Ia	132	9
SN2013gh	-19.2	Ia	707	8
SN2013gy	-19.3321	Ia	433	5
SN2016F	-19.2183	Ia	68	3

Zusätzlich zu den Supernovae vom Typ Ia wurden in der Applikation exemplarische Supernovae vom Typ Ib, Ic und II verwendet. Auch diese wurden wiederum so ausgewählt, dass es sich um typische Vertreter der jeweiligen Typen handelt.

**Tabelle 4: Übersicht der in der Applikation enthaltenen Supernovae vom Typ Ib, Ic, und II. Die Daten entstammen aus einer sehr hohen Zahl von Quellen, die in der Applikation abrufbar sind.**

Name	Mmax [mag]	Type	# Phot.	# Spec.
SN1990K	-17	II	119	31
SN2002bx	-18.2	II	105	12
SN2006V	-18.14	II	141	10
SN2008am	-23.567	II	383	7
SN2008bn	-18.32	II	109	23
SN2008bx	-17.8	II	197	10
SN1999gi	-16.3	II	383	32
SN2013am	-15.492	II	286	31
SN2008ip	-18.91	II	216	11
SN2007Y	-16.6	Ib	230	14
SN2007uy	-17.6	Ib	428	13
SN2008D	-17.6	Ib	443	49
SN2005az	-17.4	Ic	159	22
SN2004aw	-18.5	Ic	259	40
SN2004fe	-18	Ic	169	12
SN2011bm	-19	Ic	309	17
SN2013ge	-17.178	Ic	381	40
SN2015bn	-22.874	Ic	893	38
SN2005az	-17.4	Ic	159	22

Insgesamt besitzt die Applikation also Daten von 40 Supernovae. Diese stehen jeweils in zwei verschiedenen Diagrammtypen zur Verfügung, mit denen zunächst drei verschiedene Aufgabentypen erstellt werden können.

Der erste Diagrammtyp stellt verschiedene Spektren einer Supernova dar, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden und zum Teil auch unterschiedliche Wellenlängenbereiche abdecken. Die Applikation führt automatisch Korrekturen an den Messdaten durch. Aktuell wird so eine etwaige Rotverschiebung korrigiert. Ferner werden, um die Ladezeit auf Seiten der Nutzer zu reduzieren, die Daten des jeweils ausgewählten Spektrums im Browsercache (*Local Storage*) gespeichert. Da der *Local Storage* jedoch typischerweise auf 4 MB

begrenzt ist, müssen Spektren ausgeschlossen werden, deren Speicherbedarf 4 MB überschreitet.

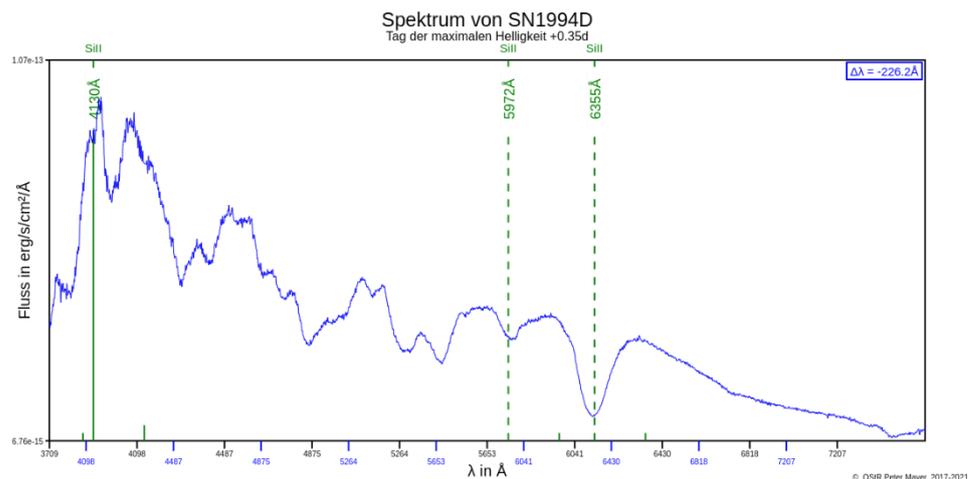
Im zweiten Diagrammtyp ist die Lichtkurve der Supernova in unterschiedlichen Beobachtungsbändern dargestellt. Für die Schüler sind jedoch im Wesentlichen lediglich die Beobachtungsbänder V (Visuell) und I (Infrarot) interessant.

### 5.4.4.3 Beispielaufgaben

#### a) Untersuchung von Spektren

Die Aufgabe für Schülerinnen und Schüler besteht zunächst darin, mit Hilfe der pro Supernova zur Verfügung stehenden Spektren den jeweiligen Typ der Supernova zu ermitteln. Anhand der in Abschnitt 5.4.4.1 beschriebenen Kriterien untersuchen die Schülerinnen und Schüler die Existenz bzw. das Fehlen von Spektrallinien.

#### i. Supernova Typ Ia



**Abbildung 40: Supernova Typ Ia – Si-Absorptions- und Emissionslinien sind zum Zeitpunkt des *Maximum Light* deutlich erkennbar. Die Stärke der Ausprägung nimmt in den Tagen danach weiter zu (z. B. Branch et al., 2004).**

(Eigene Grafik auf Basis der Daten des Open-Supernova-Catalog; detaillierte Quellenangaben können den Referenzen der einzelnen Spektren entnommen werden.)

ii. Supernova Typ Ib

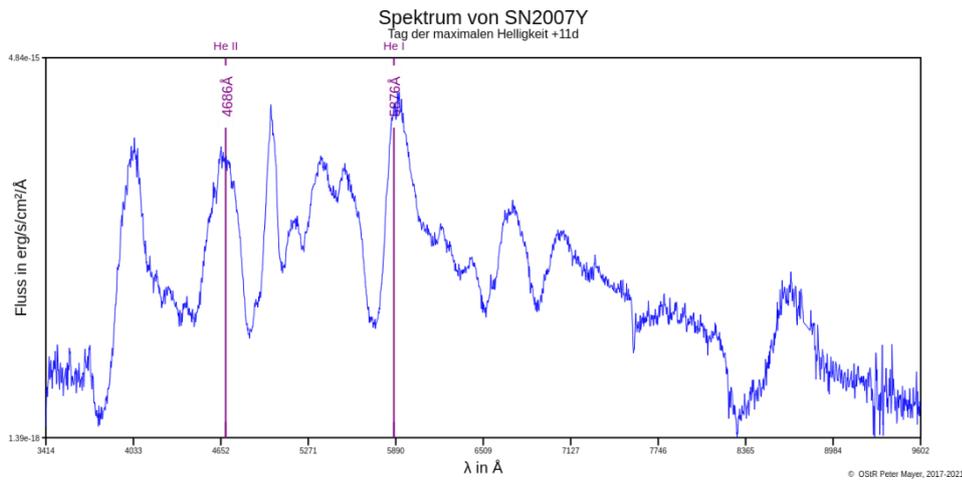


Abbildung 41: Supernova Typ Ib – Si-Linien sind schwach ausgeprägt. Stattdessen sind He-Linien deutlich erkennbar, die mit fortschreitender Zeit nach dem *Maximum Light* immer stärker ausgeprägt waren (z. B. Branch et al., 2002; Kotake et al., 2006).

(Eigene Grafik auf Basis der Daten des Open-Supernova-Catalog; detaillierte Quellenangaben können den Referenzen der einzelnen Spektren entnommen werden.)

iii. Supernova Typ Ic

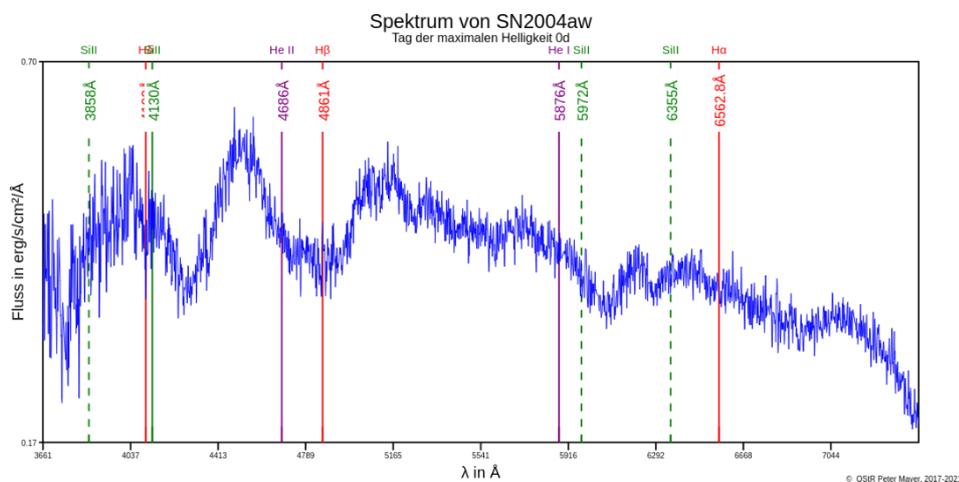
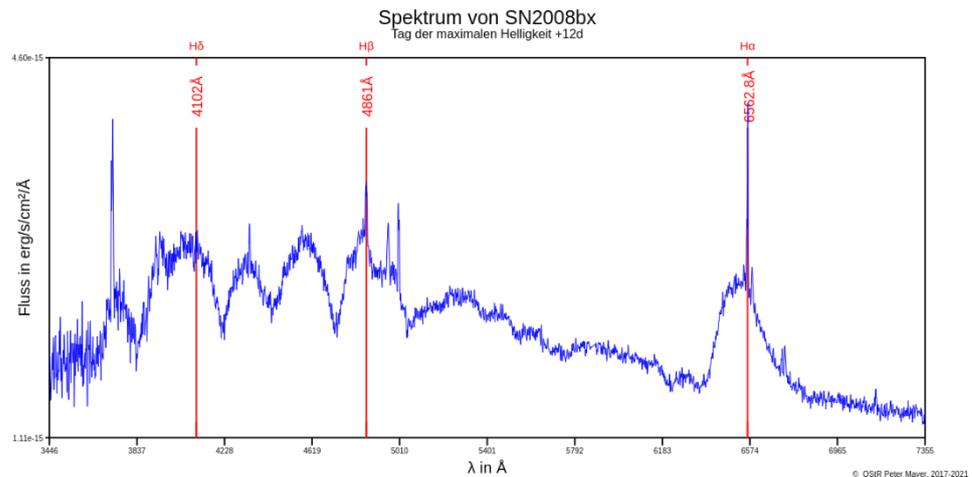


Abbildung 42: Supernova Typ Ic – Weder H-, He- noch Si-Linien sind zum Zeitpunkt des *Maximum Light* deutlich erkennbar (Branch et al., 2006; Filippenko, 1997; Kotake et al., 2006).

(Eigene Grafik auf Basis der Daten des Open-Supernova-Catalog; detaillierte Quellenangaben können den Referenzen der einzelnen Spektren entnommen werden.)

### iv. Supernova Typ II



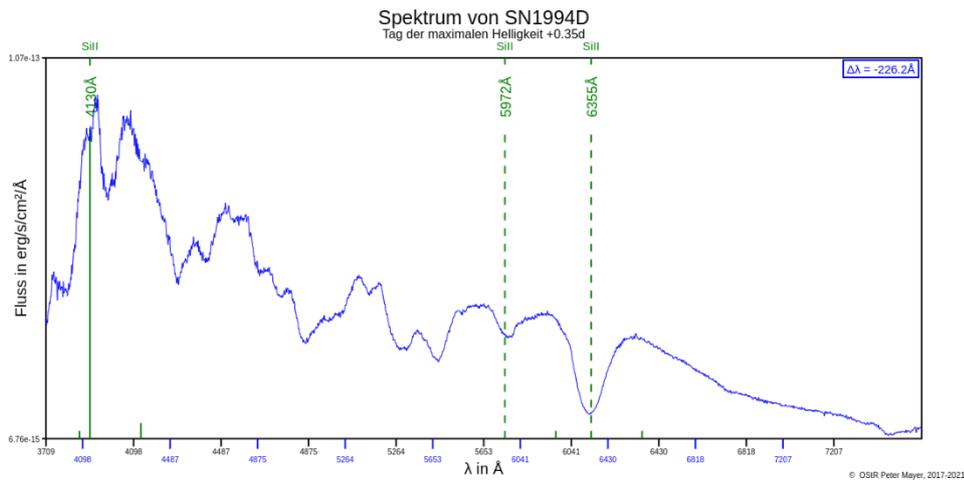
**Abbildung 43: Supernova Typ II – Wasserstofflinien sind bereits früh deutlich erkennbar. Mit zunehmender Zeit nach dem *Maximum Light* nimmt die Intensität weiter zu (Kotake et al., 2006).**

(Eigene Grafik auf Basis der Daten des Open-Supernova-Catalog; detaillierte Quellenangaben können den Referenzen der einzelnen Spektren entnommen werden.)

Mit diesem Diagrammtyp sind die Schülerinnen und Schüler in der Lage, das Vorgehen zum Nachweis von Elementen in Supernovae von echten Forscherinnen und Forschern modellhaft nachzustellen. Dabei verwenden sie vordefinierte Matrizen von ausgewählten Spektrallinien eines Elements, legen sie über das Spektrum und verschieben diese in horizontaler Richtung, bis im Idealfall eine Übereinstimmung gefunden, also das jeweilige Element im Spektrum identifiziert wird. Anhand des Entscheidungsbaums (vgl. Abbildung 35 in Abschnitt 5.4.4.1) treffen die Schülerinnen und Schüler schließlich die Entscheidung, ob es sich um eine Supernova vom Typ Ia handelt und damit die maximale absolute Helligkeit dieser Supernova bekannt ist und verwendet werden darf.

Mit Hilfe des Spektrums lässt sich jedoch nicht nur identifizieren, um welchen Typ einer Supernova es sich handelt, sondern es können auch Aussagen über Eigenschaften der Explosion selbst getroffen werden. Für Schülerinnen und Schüler ist dabei die Ermittlung der Explosions-/Auswurfgeschwindigkeit ein Anwendungsbeispiel für die Dopplerverschiebung von Spektrallinien im Themenbereich ‚Linienspektren und ihre Deutung durch die Atomphysik‘ im Lehrplan des bayerischen Gymnasiums.

b) Bestimmung der Auswurfgeschwindigkeit der Kernmaterie



**Abbildung 44:** Mit der Applikation ‚Spektrum analysieren‘ ermittelte Dopplerverschiebung der Wellenlänge  $\lambda_{Si II} = 6355 \text{ \AA}$ .

(Eigene Grafik auf Basis der Daten des Open-Supernova-Catalog; detaillierte Quellenangaben können den Referenzen der einzelnen Spektren entnommen werden.)

Manche Spektrallinien, insbesondere die von Silizium, können verschoben sein, da die Verschiebung dieser Linien mit der Auswurfgeschwindigkeit der Kernmaterie des weißen Zwerges zusammenhängt. Damit lässt sich mit Hilfe der Formeln zur Dopplerverschiebung diese Auswurfgeschwindigkeit berechnen.

Durch die horizontale Verschiebung der Hilfslinien können Schülerinnen und Schüler zunächst die Verschiebung  $\Delta\lambda$  in  $\text{\AA}$  graphisch bestimmen. Beispielsweise kann bei der SN1994D für  $\Delta\lambda$  einer Si-II-Linie ( $\lambda = 6355 \text{ \AA}$ ) zu  $\Delta\lambda = -226 \text{ \AA}$  (vgl. Abbildung 44) bestimmt werden. Bereits hier haben die Schülerinnen und Schüler eine interessante Erkenntnis gewonnen: Die Linie ist blauverschoben, d. h. die emittierende Materie bewegt sich auf den Beobachter/die Erde zu, was bei einer Explosion durchaus nachvollziehbar und zu erwarten ist. Weiter kann mit obigem Ergebnis die Auswurfgeschwindigkeit der Materie, also die Explosionsgeschwindigkeit, abgeschätzt werden:

$$v_s = c \cdot \frac{\lambda_E^2 - \lambda_s^2}{\lambda_E^2 + \lambda_s^2} \quad (5.27)$$

$$v_s = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \cdot \frac{(6129\text{\AA})^2 - (6355\text{\AA})^2}{(6129\text{\AA})^2 + (6355\text{\AA})^2} \quad (5.28)$$

$$v_s = 10,9 \frac{km}{s} \quad (5.29)$$

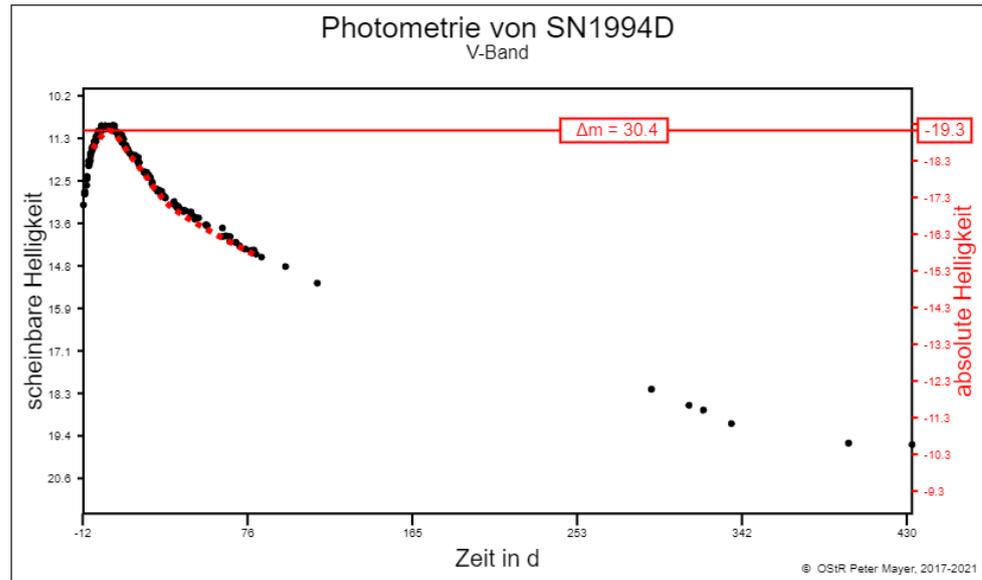


Abbildung 45: Lichtkurve inklusive Vergleich der scheinbaren maximalen Helligkeit mit der erwarteten maximalen absoluten Helligkeit der Supernova 1994D im visuellem Band.

(Eigene Grafik auf Basis der Daten des Open-Supernova-Catalog; detaillierte Quellenangaben können den Referenzen der einzelnen Spektren entnommen werden)

Nach Patat et al. (1996) beträgt die Auswurfgeschwindigkeit des Siliziums bei SN1994D zum Zeitpunkt des *Maximum Light* etwa  $11 \frac{km}{s}$ . Damit stimmen die beiden Werte in sehr guter Näherung überein.

Da dieser Aufgabentyp bereits früh in der zwölften Jahrgangsstufe des bayerischen Gymnasiums thematisiert wird, kann dieser auch unabhängig von Kenntnissen zur Sternentstehung und -entwicklung oder zu Kenntnissen über die Entfernungsbestimmung eingesetzt werden. Dieser Aufgabentyp ist insbesondere auch deshalb interessant, weil Experimente, mit denen die Dopplerverschiebung von Strahlung im Unterricht nachgewiesen werden könnte, selbstredend nicht vorhanden sind. Damit ist dies ein ideales Beispiel dafür, wie reale Messdaten aus der Forschung in den Unterricht eingebunden werden und diesen deutlich bereichern können.

### c) Entfernungsbestimmung

Nachdem die Schülerinnen und Schüler eine Supernova als Typ-Ia-Supernova identifiziert haben, ermitteln sie mit Hilfe der Lichtkurve des V-Bandes die Differenz zwischen dem Maximum der scheinbaren Helligkeit und dem Maximum der erwarteten absoluten Helligkeit ( $-19.3^m$ ). Hierzu stehen den Schülerinnen und Schülern wiederum Hilfslinien zur Verfügung, mit denen sie zum einen die erwartete Lichtkurve ‚fitten‘ (rote, gestrichelte Linie) und zum anderen die Skala der absoluten Helligkeit (rechts, rot) mit der Skala der scheinbaren Helligkeit (links, schwarz) in Verbindung bringen können. Für eine detailliertere

Beschreibung wird an dieser Stelle auf die Applikation zum HRD in Abschnitt 5.4.2.2 verwiesen. Für die Supernova SN1994D ergibt sich so ein Entfernungsmodul von  $\Delta m = 30,4^m$ . Damit lässt sich schließlich die Entfernung der Supernova bestimmen:

$$d = 10 \text{ pc} \cdot 10^{\frac{\Delta m}{5}} = 10 \text{ pc} \cdot 10^{\frac{30,4}{5}} = 12 \text{ Mpc} \quad (5.30)$$

Nach Patat et al. (1996) beträgt das Entfernungsmodul jedoch etwa  $30,68^m$ , womit sich eine Entfernung von  $14,45 \text{ Mpc}$  ergibt. Damit weicht das Ergebnis zwar etwa 17 % vom Literaturwert ab, was jedoch zu erwarten war. Denn der Helligkeitsunterschied wird lediglich graphisch auf einer vergleichsweise groben Skala ermittelt. Für den schulischen Kontext ist dieses Ergebnis gleichwohl ausreichend, da im Wesentlichen das prinzipielle Verständnis der Vorgehensweise im Zentrum des Interesses steht.

Um diese Ungenauigkeit zu vermeiden, würde sich als Aufgabenvariation anbieten, dass die Schüler einen Entfernungsbereich ermitteln, innerhalb dessen die tatsächliche Entfernung liegen sollte. Hierfür müssten die Schüler eine untere und eine obere Grenze des Entfernungsmoduls ermitteln und schließlich die Berechnung mit obiger Gleichung zweimal durchführen.

## **6. EMPIRISCHER TEIL ZUM FORTBILDUNGSKONZEPT**

In Kapitel 4 wurden die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit dargelegt. Das dort vorgestellte UTAUT-Modell muss für diese Arbeit jedoch zunächst an den schulischen Kontext angepasst werden, was in Abschnitt 5.1.1 erfolgt. Das zusätzliche technologische Wissen, mit dem das pädagogische und das Fachwissen ergänzt wird, soll mit dem in Unterkapitel 4.2 vorgestellten *Technological, Pedagogical, and Content Knowledge* (TPACK) beschrieben werden. Dieser Wissensbereich wird im Basismodell des adaptierten UTAUT-Modells nicht abgebildet, weshalb er in Abschnitt 5.1.2 zunächst in das adaptierte UTAUT-Basismodell integriert wird. Insgesamt werden dadurch mehrere mögliche Wirkzusammenhänge zwischen dem TPACK und den verschiedenen Einflussfaktoren auf das Akzeptanzverhalten im adaptierten UTAUT-Modell sichtbar. Diese Wirkzusammenhänge des erweiterten, adaptierten UTAUT-Modells sollen schließlich durch eine Prä-Post-Untersuchung, die während einer Fortbildung für Lehrkräfte durchgeführt wird, untersucht werden (vgl. Abschnitt 5.2).

In den folgenden Abschnitten wird eine Querschnittstudie beschrieben und durchgeführt, die aus zwei Teilstudien besteht. Ziel der Teilstudie 1 (vgl. Unterkapitel 6.2) ist zunächst die Validierung der Adaption des UTAUT-Modells auf Multimediaanwendungen im Physikunterricht. Im zweiten Schritt sollen dann die Zusammenhänge zwischen dem TPACK, der persönlichen Relevanz, dem wahrgenommenen Nutzen für Schülerinnen und Schüler sowie dem erwarteten Nutzen (ehemals erwarteten, persönlichen Nutzen) und den Akzeptanzfaktoren innerhalb des Modells untersucht werden (siehe auch P. Mayer und Girwidz (2019)). In der Teilstudie 2 (vgl. Unterkapitel 6.3) wird schließlich das adaptierte Modell angewandt, mit dem Ziel, einen kausalen Zusammenhang zwischen dem TPACK und dem Akzeptanzverhalten des UTAUT-Modells nachzuweisen (siehe auch P. Mayer et al. (2021)).

Mit den Daten, die im Rahmen der oben beschriebenen Fortbildungsveranstaltung für Physiklehrkräfte erhoben wurden, werden zwei Teilstudien betrachtet. Teilstudie 1 dient zur Evaluation der Erweiterung des Technologie-Akzeptanz-Modells (TAM2) (Venkatesh & Davis, 2000) um den Faktor TPACK sowie um die Umdeutung und Zusammenführung der Skalen Outputqualität und Nachweisbarkeit der Ergebnisse hin zum erwarteten Nutzen für Schülerinnen und Schüler. In der zweiten Teilstudie wird die Auswirkung des Workshops im Rahmen der angebotenen Lehrerfortbildung auf das Akzeptanzverhalten von Multimediaanwendungen untersucht.

## 6.1 Stichprobe

Insgesamt nahmen an den 21 jeweils einmaligen Fortbildungen 174 Lehrkräfte teil. Von den 174 Lehrkräften gaben 166 an, Physik zu unterrichten, fünf gaben keine Antwort und drei Teilnehmer unterrichten andere Fächer. 59 Teilnehmende (34 %) bestätigten zudem, bereits einmal Informatik unterrichtet zu haben. Außerdem gibt es unter den 174 Teilnehmenden 153 Lehrkräfte, die als zweites Unterrichtsfach Mathematik haben (6 ‚keine Angabe‘, 15 ‚keine Mathematiklehrer‘). Die Stichprobe besteht zu 58 % (101) aus männlichen Lehrkräften und zu 39 % (68) weiblichen Lehrkräften. Fünf Lehrkräfte machten keine Angabe zum Geschlecht. Die Lehrkräfte waren zum jeweiligen Erhebungszeitraum zwischen 24 und 65 Jahren alt. Das Durchschnittsalter lag bei  $M = 42,4$  Jahren ( $SD = 11,38$ ).

Von den 174 Lehrkräften beantworteten 69 Lehrkräfte (39,66 %) zu beiden Messzeitpunkten jeweils alle Items des Fragebogens zum Akzeptanzverhalten und TPACK. Weitere 101 Teilnehmende ließen jeweils vereinzelt Items unbeantwortet. Um Verzerrungen durch fehlende Werte und eine Reduktion der Fallzahlen zu vermeiden, wurde das gängige EM-Verfahren (*Expectation Maximization*) zur Datenimputation angewandt. Hierbei wurde der fehlende Wert unter Berücksichtigung vollständiger und unvollständiger Datensätze über multiple Regressionsmodelle geschätzt (vgl. (Schwippert, 2002)). Sieben Fälle mussten aus dem Datensatz entfernt werden, da sie multivariate Ausreißer darstellten<sup>2</sup>. Für die folgenden Analysen verblieben somit 165 Fälle.

Die Teilnahme an der Studie sowie der Fortbildung erfolgte freiwillig und unentgeltlich. Die Daten der Begleitstudie wurden anonym erfasst.

## 6.2 Teilstudie 1 – TAM2/UTAUT und Erweiterung

### 6.2.1 Forschungsfragen – Teilstudie 1

Wie einleitend beschrieben, bildet das Technologieakzeptanzmodell die Basis dieser Arbeit. In Unterkapitel 4.1.4 wurde bereits gezeigt, dass das TAM erfolgreich auf unterschiedliche Technologien angewandt werden kann. In der Mehrzahl der in Unterkapitel 4.1.4 aufgeführten Studien konnten die theoretischen Annahmen hinreichend bestätigt werden. Dennoch finden sich in der Literatur keine empirischen Erkenntnisse bezüglich der Anwendbarkeit des

---

<sup>2</sup> Zur Bestimmung der Ausreißer wurden im Rahmen der Datenbereinigung Mahalanobis-Distanzen berechnet. Diese wurden dann mit der Chi-Quadrat-Verteilung gleicher Freiheitsgrade verglichen. Wahrscheinlichkeitswerte kleiner 0.001 wurden als Ausreißer festgehalten und aus den Analysen entfernt.

TAM auf Multimediaanwendungen im Physikunterricht oder die damit einhergehenden Wirkzusammenhänge.

In dieser Untersuchung soll daher das Basismodell erstmals zur Analyse der Akzeptanz von Multimediaanwendungen im Physikunterricht eingesetzt werden. Um das TAM auf Multimediaanwendungen anwenden zu können, waren umfangreiche Arbeiten am Erhebungsinstrument durchzuführen. Dabei wurden die Items so umformuliert, dass sie möglichst nahe am ursprünglichen Item liegen, der Bezug zu Multimediaanwendungen aber dennoch deutlich erkennbar ist. Wegen der umfangreichen Modifikationen der Items und der Skalen ist eine Überprüfung des Fragebogens unumgänglich. Daraus ergibt sich schließlich die

### **Forschungsfrage 1 (Modifiziertes Technologie-Akzeptanz-Modell)**

*Sind die Wirkzusammenhänge sowie die Modellgütekriterien des modifizierten TAM2/UTAUT-Modells vergleichbar mit den entsprechenden Parametern des originalen TAM2/UTAUT-Modells?*

Diese Fragestellung kann nur dann zustimmend beantwortet werden, wenn sich die folgenden Hypothesen verifizieren lassen:

Hypothese 1: Die wahrgenommene Bedienbarkeit von Multimediaanwendungen beeinflusst die Verhaltensintention (VHI), diese auch im Unterricht einzusetzen. Je einfacher und intuitiver die Bedienung einer Anwendung wahrgenommen wird, desto größer ist die Intention, zukünftig die Anwendung zu nutzen.

Hypothese 2: Der wahrgenommene persönliche Nutzen von Multimediaanwendungen wird von der wahrgenommenen Bedienbarkeit der Anwendung beeinflusst. Je einfacher und intuitiver die Bedienung der Anwendung von einer Person wahrgenommen wird, desto positiver wird der Nutzen eingeschätzt, den die Anwendung der Lehrkraft bietet.

- Hypothese 3: Der erwartete Nutzen einer Multimediaanwendung für Schülerinnen und Schüler hat einen direkten Einfluss auf den wahrgenommenen persönlichen Nutzen, den eine Lehrkraft in einer Multimediaanwendung sieht. Hohe Werte auf der Skala des von einer Lehrkraft erwarteten Nutzens einer Multimediaanwendung für Schülerinnen und Schüler führen dazu, dass eine Lehrkraft den persönlichen Nutzen einer Multimediaanwendungen höher einschätzt.
- Hypothese 4: Der wahrgenommene persönliche Nutzen von Multimediaanwendungen wird von der persönlichen Relevanzeinschätzung der Anwendung beeinflusst. Je relevanter eine Lehrkraft eine Anwendung einschätzt, desto positiver wird der Nutzen ebendieser empfunden.
- Hypothese 5: Der wahrgenommene persönliche Nutzen der Multimediaanwendung beeinflusst die Verhaltensintention. Je höher der persönliche Nutzen der Multimediaanwendung von einer Lehrkraft eingeschätzt wird, desto stärker ist die Absicht ausgeprägt, zukünftig eine Multimediaanwendung einzusetzen.
- Hypothese 6: Die Verhaltensintention hat einen direkten Einfluss auf das Akzeptanzverhalten gegenüber Multimediaanwendungen. Hohe Werte auf der Skala der Intention bilden dabei eine Voraussetzung für das tatsächliche Verhalten.

Das modifizierte Technologie-Akzeptanz-Modell soll um drei weitere Faktoren erweitert werden, die im Zusammenhang mit dem schulischen Umfeld zu beachten sind. Der aktuell stattfindende gesellschaftliche Wandel hin zu einer stärker technisierten Gesellschaft kann auch am Schulunterricht, der die Schülerinnen und Schüler auf das Leben vorbereiten soll, nicht spurlos vorbei gehen. Die KMK (2016) hat daher zu Recht den Weg für Schulen vorgezeichnet, indem sie Leitlinien für die Bildung in einer digitalen Welt vorgibt, die Lehrkräfte

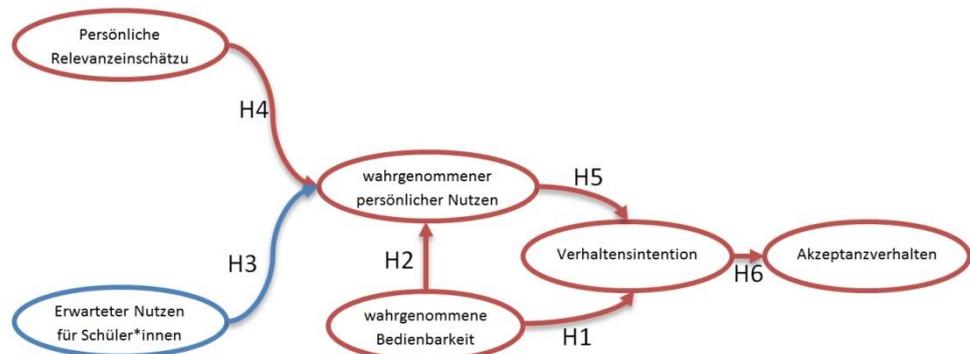


Abbildung 46: Adaptiertes TAM2-Modell (Konzeptmodell)  
Blau markiert sind Änderungen gegenüber dem TAM2-Modell (vgl. Abbildung 7)

in Zukunft noch stärker berücksichtigen müssen. Damit steigen aber auch die Anforderungen an eine Lehrkraft, insbesondere im technischen Bereich. Gleichzeitig werden in zahlreichen Studien Gründe aufgezeigt, weshalb moderne Informationstechnologien nicht oder nur in geringem Umfang im Unterricht eingesetzt werden:

Darunter fallen beispielsweise institutionelle Rahmenbedingungen, wie etwa der Lehrplan (Keengwe et al., 2008; Mumtaz, 2006), technische Rahmenbedingungen, wie etwa die Ausstattung (Keengwe et al., 2008; Mumtaz, 2006; Panda & Mishra, 2007), oder eine nicht ausreichende Aus- und Fortbildung von Lehrkräften (Koc & Bakir, 2010), die die Akzeptanz und das Akzeptanzverhalten derartiger Technologien auf Seiten der Lehrkräfte negativ beeinträchtigen können. Die zuerst genannten Faktoren können aus pädagogischer Sicht und aus der Lehrerperspektive nur marginal beeinflusst werden. Allerdings benötigt eine Lehrkraft auch ein breites Wissen über Technologien und darüber, wie diese Technologien in den Unterricht eingebunden werden können (M. J. Koehler et al., 2014; J. M. Koehler & Mishra, 2009; Mishra & Koehler, 2006). Damit kommt dem TPACK einer Lehrkraft eine Schlüsselrolle hinsichtlich der Integration neuer Technologien, insbesondere von Multimediaanwendungen, in den Unterricht zu. In der aktuellen Forschung zum Technologie-Akzeptanz-Modell wird dieser Aspekt jedoch nicht berücksichtigt, weshalb im Rahmen dieser Studie das modifizierte Technologie-Akzeptanz-Modell (Basismodell) um den Faktor TPACK erweitert wird. Anhand der damit einhergehenden Änderungen am Basismodell lässt sich nun eine weitere Forschungsfrage ableiten:

**Forschungsfrage 2 (Erweiterung des Basismodells um den Einflussfaktor TPACK)**

*Lässt sich das Technologie-Akzeptanz-Modell (UTAUT; TAM2) durch eine Erweiterung um das TPACK sowie durch die Anpassung an den schulischen Kontext in seiner Prädiktionskraft in Bezug auf Multimediaanwendungen im Physikunterricht verbessern?*

Diese Fragestellung kann nur dann zustimmend beantwortet werden, wenn sich die folgenden Hypothesen verifizieren lassen:

Hypothese 7:            Das TPACK beeinflusst den von einer Lehrkraft wahrgenommenen persönlichen Nutzen einer Multimediaanwendung. Besitzt eine Lehrkraft einen hohen Wert auf der TPACK-Skala, so nimmt diese die Nutzung von Multimediaanwendungen als gewinnbringend für sich selbst wahr.

- Hypothese 8: Das TPACK beeinflusst den durch die Lehrkraft wahrgenommenen Schülernutzen einer Multimediaanwendung. Besitzt eine Lehrkraft einen hohen Wert auf der TPACK-Skala, so nimmt diese Lehrkraft die Nutzung von Multimediaanwendungen als gewinnbringend für ihre Schülerinnen und Schüler wahr.
- Hypothese 9: Das TPACK beeinflusst die persönliche Relevanzeinschätzung einer Lehrkraft gegenüber Multimediaanwendungen. Besitzt eine Lehrkraft einen hohen Wert auf der TPACK-Skala, so schätzt diese Multimediaanwendungen als relevant für ihre Lehrtätigkeit ein.
- Hypothese 10: Das TPACK hat einen direkten Einfluss auf die von der Lehrkraft wahrgenommene Bedienbarkeit einer Multimediaanwendung. Besitzt eine Lehrkraft einen hohen Wert auf der TPACK-Skala, so nimmt sie eine Multimediaanwendung als leicht zu bedienen wahr.
- Hypothese 11: Die Verhaltensintention tritt als Mediatorvariable zwischen dem von der Lehrkraft erwarteten persönlichen Nutzen von Multimediaanwendungen und dem Akzeptanzverhalten auf.
- Hypothese 12: Durch die Erweiterung des adaptierten UTAUT-Modells um den Einflussfaktor TPACK kommt es zu keinen signifikanten Änderungen bei Wirkzusammenhängen im Vergleich zum Basismodell ohne den Einflussfaktor TPACK.

### 6.2.1 Methodik

#### 6.2.1.1 Erhebungsinstrument zum Technologieakzeptanzmodell

In dieser Studie wird auf den von Venkatesh und Davis (2000) zum Technologieakzeptanzmodell veröffentlichten, englischsprachigen Fragebogen zurückgegriffen. Die Übersetzung dieses Fragebogens wurde von Olbrecht (2010) vorgenommen, der ihn nach einer gängigen Methode zur Übersetzung von fremdsprachlichen Fragebögen in einem mehrstufigen Übersetzungs- und Rückübersetzungsprozess mit Hilfe von Muttersprachlern ins Deutsche übertragen und auf Äquivalenz überprüft hat. Die Items wurden jedoch für die Anwendung zur Untersuchung des Akzeptanzverhaltens bei Multimediaanwendungen im Physikunterricht adaptiert. Eine Gegenüberstellung der einzelnen Items aus dem Original-Fragebogen von Venkatesh und Davis (2000), der Übersetzung der Items ins Deutsche von Olbrecht (2010) und der auf Multimediaanwendungen adaptierten Items dieser Studie ist in

Tabelle 25 im Anhang zu finden.

Für die Beantwortung der Forschungsfragen wurden darüber hinaus weitere Skalen aus anderen Fragebögen benötigt. Dazu wurde ein Übersetzungs- und Rückübersetzungsverfahren, in Anlehnung an den von Olbrecht (2010) verwendeten Übersetzungsprozess, angewandt, um eine möglichst exakte Übereinstimmung mit den jeweiligen Originalfragebögen zu gewährleisten. Zudem wurden diese Fragebögen jeweils auf Multimediaanwendungen adaptiert. Die Skalen, mit denen das TPACK gemessen wird, wurden aus verschiedenen Fragebögen (An & Reigeluth, 2012; L. Archambault & Crippen, 2009; C. R. Graham et al., 2009) zusammengestellt und adaptiert. Die Skalen wurden im Anschluss im Rahmen einer Vorstudie auf innere Konsistenz getestet und optimiert (vgl. Tabelle 26 im Anhang). Die Skala zur ‚persönlichen Relevanzeinschätzung‘ basiert auf dem Fragebogen von Venkatesh und Davis (2000) und wurde um spezifische Items zu Multimediaanwendungen ergänzt, um so ein breiteres Spektrum der persönlichen Relevanz abschätzen zu können.

Zur Beantwortung der Forschungsfragen und zur Prüfung der daraus resultierenden Hypothesen kommen diverse statistische Methoden zum Einsatz. Beispielsweise erfolgt die Überprüfung der Konsistenz der einzelnen Skalen mit dem Programm IBM SPSS Statistics. Dieses ist ein modular aufgebautes Programmpaket zur statistischen Analyse von Daten. Dieses Paket ermöglicht das Datenmanagement sowie umfangreiche statistische und grafische Datenanalysen mit zahlreichen gängigen statistischen Verfahren. Des Weiteren wurden Strukturgleichungsmodelle mit der SPSS-Erweiterung AMOS 25 abgeschätzt. Dabei finden zur Berechnung der statistischen Modelle Kovarianzmatrizen Anwendung. Die Abschätzung des Modells sowie die Modellbewertung werden mit dem *Maximum-Likelihood*-Schätzverfahren (ML) durchgeführt (Jöreskog, 1967). Zur Bewertung der Modellgüte der mit AMOS abgeschätzten Modelle werden verschiedene Fit-Indizes angegeben. Hu und Bentler (1999) haben hierzu verschiedene *Cutoff*-Kriterien festgelegt. Demnach werden in dieser Studie der  $\chi^2$ -Test, die Anzahl der Freiheitsgrade (df) sowie der *Root Mean Square Error of Approximation* (RMSEA) und der *Comparative-Fit-Index* (CFI) in der Ergebnisdarstellung ausgewiesen.

#### **6.2.1.2 $\chi^2$ -Test**

Mit dem  $\chi^2$ -Test oder  $\chi^2$ -Differenzentest wird die Nullhypothese geprüft, inwieweit das abgeschätzte Modell mit der empirischen Datenstruktur übereinstimmt. Die Zahl des Freiheitsgrades ist demnach gleich der Differenz der nichtredundanten beobachteten Varianzen und Kovarianzen minus der Zahl der

zu schätzenden freien Parameter. Weist das Modell  $a$  beobachtete Variablen auf und  $t$  zu schätzende freie Parameterwerte, gilt:

$$df = \frac{a(a + 1)}{2} \cdot t$$

Obwohl der Chiquadrat-Goodness-of-fit-Test statistisch begründet ist, sollte bei seiner Interpretation vorsichtig vorgegangen werden, denn dieser Test steht in einer starken Korrelation zur Stichprobengröße. So reagiert der Index bei großen  $n$  sehr sensibel auf kleine Abweichungen vom perfekten Modell, sodass die Hypothese schneller und fälschlicherweise verworfen wird. Andererseits reagiert er bei kleinen  $n$  sehr träge, d. h., dass hier bei vergleichsweise großen Abweichungen vom perfekten Modell die Nullhypothese fälschlicherweise angenommen wird. Trotz dieser Probleme sollten nach Bühner (2010) der  $\chi^2$ -Wert sowie der zugehörige p-Wert immer mitangegeben werden. Jöresko (1970) schlägt zusätzlich vor, den  $\chi^2$ -Wert durch die Anzahl der Freiheitsgrade zu dividieren. Als Faustregel kann hier angenommen werden, dass ein  $\chi^2/df < 1$  einem *Overfit* entspricht. Dies bedeutet, dass die Spezifizierung eines Modells zu viele erklärende Variablen enthält. In

Tabelle 5 sind die Fit-Indizes der verschiedenen Gütekriterien aufgelistet. Dort ist auch beschrieben, in welchen Bereichen ein ‚guter Fit‘ bzw. ein ‚akzeptabler Fit‘ vorliegt.

**Tabelle 5: Fit-Indizes**

Fit-Index	Guter Fit-Wert	Noch akzeptabler Fit-Wert
$\chi^2$	$0 \leq \chi^2 \leq 2 \cdot df$	$2 \cdot df < \chi^2 \leq 3 \cdot df$
$\chi^2/df$	$1 \leq \chi^2/df \leq 2$	$2 < \chi^2/df \leq 3$
RMSEA	$0 \leq RMSEA \leq 0,05$	$0,05 < RMSEA \leq 0,08$
CFI	$0,97 \leq CFI \leq 1,00$	$0,95 \leq CFI < 0,97$

In der Tabelle findet sich auch das Gütekriterium *Root Mean Square Error of Approximation* (RMSEA). Der RMSEA kann auf Arbeiten von Browne et al. (1993) zurückgeführt werden. Er analysiert die Abweichung der empirischen Varianz von der implizierten Varianz-Kovarianzmatrix. Nach Bühner (2010) können folgende *Cutoff*-Werte in Abhängigkeit der Stichprobengröße verwendet werden:

- $N > 250 \rightarrow RMSEA \leq 0.06$
- $N < 250 \rightarrow RMSEA \leq 0.08$

Mit dem *Comparative-Fit-Index* (CFI) wird die Modellanpassung analysiert, indem die relative Übereinstimmung zwischen den erhobenen Daten und einem hypothetischen Nullmodell untersucht wird und dabei die Probleme der Stichprobengröße des Chi-Quadrat-Tests (Sensitivität gegenüber der Stichprobengröße) aufgelöst werden. Die Werte des CFI liegen in einem Intervall von 0, das für keine Übereinstimmung steht, und 1, das für eine maximale Übereinstimmung steht. Der CFI sollte mindestens 0.95 betragen. Nach Bühner (2011, S. 427) sollte der CFI um die 0.95 oder darüber liegen, um von einer guten Übereinstimmung zu sprechen. Der Begriff ‚um die‘ wird hier und in anderen Literaturquellen nicht näher definiert. Allerdings gibt es zahlreiche Studien, bei denen ein CFI von 0.8 bis 0.9 als ausreichend erachtet wird (Im et al., 2010; Ward et al., 2008).

Andere Fit-Indizes, wie der GFI, wurden aus unterschiedlichen Gründen im Rahmen dieser Untersuchung nicht verwendet. Der GFI konnte beispielsweise nicht bestimmt werden, da der erhobene Datensatz Fehlwerte aufweist. Darüber hinaus raten Hu und Bentler (1999, S. 5) von der Verwendung des GFI zur Güteeinschätzung eines Modells explizit ab, da die Abhängigkeit von der Stichprobengröße zu groß ist und mit ihnen keine Vergleichbarkeit zwischen Studien mit unterschiedlichen Stichprobengrößen gegeben ist. Nach Bühner (2011, S. 425) sollte außerdem der *Standardized-Root-Mean-Residual-Index* (SRMR-Index) bestimmt werden. Dies ist aber, ähnlich wie beim GFI, nicht möglich, da der betrachtete Datensatz Fehlwerte aufweist und der SRMR deshalb nicht bestimmt werden kann.

In dieser Arbeit finden zwei unterschiedliche Darstellungsformen für Modelle Anwendung. Die Konzeptmodelle werden im Rahmen der Hypothesenbesprechung verwendet, um die strukturellen Beziehungen zwischen den latenten Modellvariablen zu veranschaulichen. Die statistischen Modelle hingegen werden im Rahmen der Ergebnisdarstellung und Diskussion verwendet. Die statistischen Modelle beinhalten neben der strukturellen Beziehung auch statistische Informationen zu den Ladungen und zur Modellgüte. Die Darstellung der statistischen Angaben orientiert sich am allgemeinen wissenschaftlichen Vorgehen. Deshalb werden in den statistischen Modellen nur standardisierte Werte verwendet und angegeben. Auf dem 1%-Niveau signifikante Werte werden durch drei Sterne (\*\*\*) und auf dem 5%-Niveau signifikante Werte mit einem Stern (\*) gekennzeichnet.

### **6.2.1.3 Item- und Skalencharakteristika**

Eine fundierte Beantwortung der Forschungsfragen ist nur dann möglich, wenn die im Fragebogen verwendeten Items die zu untersuchenden Konstrukte ausreichend gut repräsentieren. Dazu sind in den nachfolgenden Tabellen zu allen

Skalen die einzelnen Items zusammen mit ihren Mittelwerten, den Standardabweichungen, der Trennschärfe und dem Alpha-Koeffizienten (Cronbachs Alpha) aufgelistet.

Die Items wurden auf einer fünfstufigen Likert-Skala von 1 = ‚stimme überhaupt nicht zu‘ bis 5 = ‚stimme voll und ganz zu‘ von den Teilnehmern beantwortet. Lediglich die Items zu den Skalen des Konstrukts TPACK wurden auf einer sechsstufigen Likert-Skala von 1 = ‚stimme überhaupt nicht zu‘ bis 6 = ‚stimme voll und ganz zu‘ bearbeitet. Diese Skalen wurden zunächst mit

$$Y = \frac{(B - A) \cdot (x - a)}{(b - a)} + A$$

in eine fünfstufige Likert-Skala umgerechnet. Dabei gilt:

- $a$ : das ursprüngliche Minimum der Skala (1)
- $b$ : das ursprüngliche Maximum der Skala (6)
- $A$ : das neue Minimum der Skala (1)
- $B$ : das neue Maximum der Skala (5)

Die Mittelwerte aller Items liegen zwischen 2,8 und 4,05 und weisen darauf hin, dass die Lehrerinnen und Lehrer die gestellten Aussagen im Durchschnitt zustimmend beantwortet haben.

Der Grad der Messgenauigkeit wird durch die Reliabilität angegeben. Sie beschreibt die Verlässlichkeit der Messung und gibt den Anteil der Varianz an, der durch tatsächliche Unterschiede im zu messenden Merkmal und nicht durch Messfehler erklärt werden kann. Als Reliabilitätskriterium dient der von Cronbach (1951) eingeführte Alpha-Koeffizient, das sogenannte Cronbachs Alpha, das auf der durchschnittlichen Korrelation zwischen den einzelnen Items einer Skala beruht. Nach George und Mallery (2003, S. 231) sowie Bortz und Weber (2005) können die in Tabelle 6 aufgeführten Grenzwerte für das Cronbachs Alpha zur Interpretation der Reliabilität herangezogen werden.

**Tabelle 6: Faustregel zur Interpretation des Cronbachs  $\alpha$**

$\alpha$	Bedeutung
> 0,9	exzellent
> 0,8	gut
> 0,7	akzeptabel
> 0,6	fragwürdig
> 0,5	schlecht
≤ 0,5	inakzeptabel

Demnach deutet ein Cronbachs Alpha von über .80 auf eine gute und ein Cronbachs Alpha von über .90 auf eine exzellente innere Konsistenz der Skala hin. Für den Fragebogen, der in dieser Studie verwendet wurde, wurde ein Cronbachs Alpha für die einzelnen Skalen zwischen .84 und .93 ermittelt. Damit liegen die Skalen in einem guten bis exzellenten Bereich. Die einzige Ausnahme bildet die Skala ‚Wahrgenommene Bedienbarkeit‘, die mit .75 aber noch in einem akzeptablen Bereich liegt. Vor allem die Skalen zu TPACK sowie die ursprünglichen Skalen zum Technologieakzeptanzmodell (wahrgenommene Bedienbarkeit, Intention, wahrgenommener Nutzen und Akzeptanzverhalten) liegen jeweils in den Bereichen der Originalstudien. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Items gut ins Deutsche überführt wurden.

Die Trennschärfe gibt nach Bühner (2011, S. 171–172) an, „*wie gut ein Item die angestrebte Fähigkeit oder Eigenschaft misst*“. Dabei wird die Trennschärfe durch eine Korrelation zwischen dem Item und der Skala quantifiziert und beschreibt, wie gut ein einzelnes Item inhaltlich alle anderen Items der Skala widerspiegelt. Die Trennschärfe soll zudem eine Einschätzung ermöglichen, wie gut ein Item zwischen Probanden mit niedriger und hoher Merkmalsausprägung auflöst. Damit erlaubt ein trennscharfes Item eine Vorhersage, wonach eine Person mit einem hohen Testergebnis oder einer hohen Merkmalsausprägung bei einem gegebenen Item einen hohen Wert erzielt. Die Trennschärfe entspricht nach Bühner (2011, S. 172) einer Produkt-Moment-Korrelation ( $\rho$ ), die auch als Pearson-Korrelation oder als bivariate Korrelation bezeichnet wird. Der Koeffizient für die Trennschärfe liegt im Wertebereich von -1 und +1. Werte zwischen 0.3 und 0.5 gelten als mittelmäßig, Werte ab 0.5 können nach Weise (1975) als hoch interpretiert werden. Die Werte der Trennschärfenanalyse für die Items des Akzeptanzfragebogens variieren, bis auf wenige Ausnahmen, zwischen .55 und .88. Damit können die Items als prototypisch für die jeweilige Skala bezeichnet werden.

Insgesamt kann auf Basis der ermittelten Item- und Skalencharakteristika gefolgert werden, dass die untersuchten Items für weitergehende Analysen geeignet sind.

**Tabelle 7: Skalenübersicht – Persönliche Relevanzeinschätzung**

Item		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>TS</i>	<i>α</i>
Persönliche Relevanzeinschätzung					,85
PersRel_1	Multimediaanwendungen sind dazu geeignet, komplexe neue Inhalte zu veranschaulichen.	3,93	,740	,693	
PersRel_2	Multimediaanwendungen sind dazu geeignet, komplexe neue Inhalte zu erklären.	3,71	,832	,540	
PersRel_3	Multimediaanwendungen sind dazu geeignet, bereits gelernte Inhalte zu wiederholen.	4,08	,719	,641	

PersRel_4	Multimediaanwendungen sind dazu geeignet, verschiedene Themenbereiche miteinander zu vernetzen.	3,86	,782	,646
PersRel_5	Multimediaanwendungen sind für die anschauliche Gestaltung des Stundeneinstiegs geeignet.	3,96	,870	,534
PersRel_6	Multimediaanwendungen sind dazu geeignet, Übungsaufgaben zu veranschaulichen.	3,81	,782	,628
PersRel_7	Multimediaanwendungen sind dazu geeignet, die Schüler für den Lerngegenstand zu motivieren.	4,05	,710	,600
PersRel_8	Im Lehrberuf ist die Verwendung von Multimediaanwendungen relevant.	3,81	,903	,441

**Tabelle 8: Skalenübersicht – Wahrgenommener Nutzen für SuS**

Item		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>TS</i>	<i>α</i>
Wahrgenommener Nutzen für SuS					,84
eNutzfSuS_1	Ich erwarte, dass Schülerinnen und Schüler, die mit Unterstützung von Multimediaanwendungen unterrichtet wurden, mehr Fachwissen erlangt haben.	2,80	,899	,727	
eNutzfSuS_2	Ich erwarte, dass Schülerinnen und Schüler, die mit Unterstützung von Multimediaanwendungen unterrichtet wurden, das Erlernte flexibler auf andere Sachverhalte anwenden können.	3,12	,920	,736	
eNutzfSuS_3	Ich erwarte, dass Schülerinnen und Schüler, die mit Unterstützung von Multimediaanwendungen unterrichtet wurden, eine ausgeprägtere Fachsprache haben.	2,54	,897	,643	
eNutzfSuS_4	Das Einbinden von Multimediaanwendungen in den naturwissenschaftlichen Unterricht hilft den Schülerinnen und Schülern beim Lernen.	3,77	,734	,615	
eNutzfSuS_5 (umkodiert)	Multimediaanwendungen binden die Aufmerksamkeit der Schülerinnen und Schülern, sind aber im Lernprozess nicht hilfreich.	3,49	1,017	,283	
eNutzfSuS_6	Schülerinnen und Schüler erlernen durch Multimediaanwendungen mehr Fachwissen.	3,10	,842	,424	
eNutzfSuS_7	Schülerinnen und Schüler erlernen durch Multimediaanwendungen, wie ein Sachverhalt auf unterschiedliche Arten veranschaulicht werden kann.	3,87	,777	,435	

**Tabelle 9: Skalenübersicht – Wahrgenommener Bedienbarkeit**

Item		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>TS</i>	<i>α</i>
Wahrgenommener Bedienbarkeit					,75
wBed_1	Der Umgang mit Multimediaanwendungen ist für mich klar und verständlich.	3,71	1,008	,656	
wBed_2	Der Umgang mit Multimediaanwendungen erfordert von mir große geistige Anstrengung.	3,53	1,096	,416	
wBed_3	Ich finde die Nutzeroberfläche der meisten heutigen Multimediaanwendungen leicht zu bedienen.	3,27	1,002	,597	
wBed_4	Damit Multimediaanwendungen gewinnbringend in den Unterricht eingebaut werden können, wäre ein Assistent notwendig, der sich um die Bedienung kümmert.	3,38	1,228	,501	

**Tabelle 10: Skalenübersicht – Wahrgenommener persönlicher Nutzen**

Item		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>TS</i>	$\alpha$
Wahrgenommener persönlicher Nutzen					,84
wNutz_1	Die Nutzung von Multimediaanwendungen verbessert meine Lehrleistung.	3,57	,792	,715	
wNutz_2	Die Nutzung von Multimediaanwendungen reduziert mittelfristig meine Arbeitsbelastung.	3,27	1,059	,400	
wNutz_3	Die Nutzung von Multimediaanwendungen steigert die Effektivität meiner Arbeit.	3,46	,858	,599	
wNutz_4	Ich finde Multimediaanwendungen nützlich für meine Arbeit.	3,97	,803	,644	
wNutz_5	Die Nutzung von Multimediaanwendungen erhöht die Lernleistung meiner Schüler.	3,51	,802	,654	
wNutz_6	Ein abwechslungsreicher Gebrauch von Multimediaanwendungen ist wichtig für das Lernen.	3,69	,795	,600	

**Tabelle 11: Skalenübersicht – Verhaltensintention**

Item		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>TS</i>	$\alpha$
Verhaltensintention					,90
VHI_1	Angenommen, ich habe an der Schule Zugang zu Multimediaanwendungen, dann setze ich diese im Unterricht ein.	3,90	,791	,816	
VHI_2	Wenn ich Zugang zu Multimediaanwendungen bekomme, sage ich voraus, dass ich sie nutzen werde.	3,84	,861	,816	

**Tabelle 12: Skalenübersicht – Akzeptanzverhalten**

Item		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>TS</i>	$\alpha$
Akzeptanzverhalten					,91
AKV_1	Ich verwende häufig Multimediaanwendungen im Unterricht.	3,19	,974	,841	
AKV_2	Ich setze Multimediaanwendungen im Unterricht intensiv ein.	2,77	1,072	,841	

**Tabelle 13: Skalenübersicht – Inhaltswissen (CK)**

Item		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>TS</i>	$\alpha$
Inhaltswissen (CK)					,86
CK_1	Ich habe für das Unterrichten meines Fachgebiets ausreichend Fachwissen.	4,47	,590	,751	
CK_2	Ich kann über Inhalte meines Fachgebiets nachdenken wie ein Fachwissenschaftler.	3,97	,834	,617	
CK_3	Ich kann selbstständig ein tiefgehendes Verständnissniveau fachlicher Inhalte meines Fachgebiets erreichen.	4,38	,638	,710	
CK_4	Ich bin zuversichtlich, dass ich alle Fachinhalte unterrichten kann.	4,54	,609	,782	

**Tabelle 14: Skalenübersicht – Pädagogisches Inhaltswissen (PCK)**

Item		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>TS</i>	<i>α</i>
Pädagogisches Inhaltswissen (PCK)					,86
PCK_1	Ich schaffe es auch OHNE den Einsatz von modernen Technologien, den Unterrichtsinhalt auf unterschiedlichen Wegen verständlich zu machen.	4,07	,722	,645	
PCK_2	Ich schaffe es auch OHNE den Einsatz von modernen Technologien, den Lernschwierigkeiten meiner Schülerinnen und Schüler erfolgreich entgegenzuwirken.	3,99	,702	,678	
PCK_3	Ich schaffe es auch OHNE den Einsatz von modernen Technologien, meine Schülerinnen und Schüler zu tiefergehenden Diskussionen über den Unterrichtsinhalt anzuregen.	3,89	,795	,718	
PCK_4	Ich schaffe es auch OHNE den Einsatz von modernen Technologien, meine Schülerinnen und Schüler zur Lösung von Alltagsproblemen aus meinem Fachgebiet anzuregen.	3,92	,755	,735	
PCK_5	Ich schaffe es auch OHNE den Einsatz von modernen Technologien, den Lernprozess meiner Schülerinnen und Schüler in meinem Fachgebiet zu fördern.	3,96	,646	,754	
PCK_6	Ich kenne Kriterien für die Auswahl und den Einsatz von Multimediaanwendungen, die die Grundlage für einen erfolgreichen Lernprozess bilden sollen.	3,70	,855	,480	
PCK_7	Ich kann Multimediaanwendungen auf Basis von konkreten Kriterien auswählen, um so die Lernleistung von Schülerinnen und Schülern zu steigern.	3,70	,816	,497	

**Tabelle 15: Skalenübersicht – Pädagogisches Wissen (PK)**

Item		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>TS</i>	<i>α</i>
Pädagogisches Wissen (PK)					,88
PK_1	Ich bin in der Lage, für meine Schülerinnen und Schüler anspruchsvolle Aufgaben zu erstellen, sodass diese ihren Horizont erweitern können.	4,06	,734	,486	
PK_2	Ich bin in der Lage, meine Schülerinnen und Schüler zur Verinnerlichung von adäquaten Lernstrategien anzuleiten.	3,81	,736	,819	
PK_3	Ich bin dazu in der Lage, meine Schülerinnen und Schüler bei der Reflexion ihres Lernprozesses zu unterstützen.	3,81	,740	,836	
PK_4	Ich bin dazu in der Lage, meine Schülerinnen und Schüler dazu anzuleiten, ihre eigenen Lernstrategien zu reflektieren.	3,64	,782	,779	
PK_5	Ich bin dazu in der Lage, meine Schülerinnen und Schüler im Rahmen von Gruppenarbeiten zur effektiven Diskussion anzuregen.	3,58	,823	,647	

**Tabelle 16: Skalenübersicht – Technologisches, pädagogisches und Inhaltswissen (TPACK)**

Item		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>TS</i>	$\alpha$
Technologisches, pädagogisches und Inhaltswissen (TPACK)					,90
TPACK_1	Ich kann Diskussionsthemen aus meinem Fachgebiet formulieren und die Kooperation der Schülerinnen und Schüler durch den Einsatz von geeigneten Webanwendungen (Google Docs, Diskussionsforen, Chatportale, ...) fördern.	3,07	1,068	,639	
TPACK_2	Ich kann Schüleraktivitäten mit Hilfe von Multimediaanwendungen (Mindmaps, Wikis, Moodle, Mebis, ...) strukturieren, sodass diese Aktivitäten meinen Schülerinnen und Schülern bei der Konstruktion von multiplen Repräsentationen eines Fachinhalts unterstützen.	3,23	,953	,774	
TPACK_3	Ich kann mittels geeigneter Multimediaanwendungen (z. B. Simulationen, Online-Inhalte ...) Aktivitäten zum selbstständigen Lernen von Fachinhalten entwerfen.	3,57	,948	,793	
TPACK_4	Ich kann mit Hilfe von Multimediaanwendungen Aktivitäten zum selbstständigen Erforschen von fachlichen Unterrichtsgegenständen entwerfen.	3,55	,928	,800	
TPACK_5	Ich kann schülerzentrierte Unterrichtsstunden entwerfen, die in geeigneter Weise fachliche Inhalte, technologische Aspekte und pädagogische Gesichtspunkte vereinen.	3,79	,903	,752	

**Tabelle 17: Skalenübersicht – Technologisches Inhaltswissen (TCK)**

Item		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>TS</i>	$\alpha$
Technologisches Inhaltswissen (TCK)					,88
TCK_1	Ich kann Software verwenden, die speziell für mein Fachgebiet entwickelt wurde (z. B. CassyLab, Vernier VideoPhysics, ...).	3,68	1,149	,716	
TCK_2	Ich kenne die wesentlichen Technologien, die ich zur Erforschung von Fachinhalten meines Unterrichtsgegenstandes benötige.	3,81	,946	,762	
TCK_3	Ich kann geeignete Technologien (z. B. Multimediaanwendungen, Simulationen, ...) einsetzen, um meinen Unterrichtsgegenstand zu veranschaulichen.	3,98	,843	,810	
TCK_4	Ich kann Multimediaanwendungen einsetzen, um den Schülerinnen und Schülern ein entdeckendes Lernen zu ermöglichen.	3,77	,816	,721	

**Tabelle 18: Skalenübersicht – Technologisches-Pädagogisches Wissen (TPK)**

Item		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>TS</i>	$\alpha$
Technologisches-Pädagogisches Wissen (TPK)					,90
TPK_1	Ich bin in der Lage, moderne Technologien einzusetzen, um meine Schülerinnen und Schüler in Alltagsprobleme einzuführen.	3,85	,864	,712	
TPK_2	Ich bin in der Lage, meinen Schülerinnen und Schülern die Planung und die Überwachung des eigenen Lernprozesses durch geeignete Technologien zu erleichtern.	3,35	,885	,795	
TPK_3	Durch den Einsatz von modernen Technologien bin ich in der Lage, meinen Schülerinnen und Schülern die Entwicklung unterschiedlicher Wissensrepräsentationen zu erleichtern.	3,51	,904	,810	
TPK_4	Ich bin durch den Einsatz von modernen Technologien in der Lage, meinen Schülerinnen und Schülern die Kooperation untereinander zu erleichtern.	3,31	,894	,756	

**Tabelle 19: Skalenübersicht – Technologiewissen (TK)**

Item		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>TS</i>	$\alpha$
Technologiewissen (TK)					,93
TK_1	Ich habe die nötigen technischen Fertigkeiten, um Computer effektiv einzusetzen.	3,98	,928	,803	
TK_2	Ich kann mir den Einsatz von neuen Technologien leicht selbst beibringen.	3,89	,948	,875	
TK_3	Ich weiß, wie ich beim Einsatz von modernen Technologien auftretende technische Probleme lösen kann.	3,53	1,083	,864	
TK_4	Ich halte stets mit der aktuellen technischen Entwicklung schritt.	3,54	1,038	,825	

Analog zu F. D. Davis (1989) und Venkatesh und Davis (2000) wird auch in dieser Studie das Akzeptanzverhalten mittels selbstberichtetem Verhalten operationalisiert. Hierzu beantworten die Studienteilnehmer zwei Fragen (AKV\_1 und AKV\_2) zur Nutzungshäufigkeit und -intensität. Legris et al. (2003) legten eine Metastudie vor, in der sie feststellten, dass von 22 untersuchten Studien in 21 dieses Vorgehen zur Ermittlung der Nutzungshäufigkeit im Vergleich zu anderen Ermittlungsmethoden, wie der Auswertung von Server-Logs, vorgezogen wurde. Ein aktuelles Beispiel, bei dem die Nutzungshäufigkeit mit Server-Logs erfolgte, ist die Studie von Richtberg (2018). Für die in dieser Studie verwendete Skala lassen sich eine hohe Reliabilität von  $\alpha = .91$  und eine gute Trennschärfe von .841 ermitteln.

## 6.2.2 Ergebnisse – Teilstudie 1

Die Beantwortung der oben beschriebenen Forschungsfragen erfolgt durch die Überprüfung von theoretisch begründeten Annahmen mit Hilfe von empirisch geprüften Strukturgleichungsmodellen. Zunächst wird die erste Forschungsfrage, ob das von Venkatesh und Davis (2000) vorgestellte Technologieakzeptanzmodell (UTAUT; TAM2) für die Prädiktion der Akzeptanz von Multimediaanwendungen im Physikunterricht verwendet werden kann, beantwortet. Im Anschluss wird der Einfluss des TPACK auf die Prädiktion der Akzeptanz von Multimediaanwendungen untersucht. Durch die zweite Forschungsfrage soll ermittelt werden, ob die Modellerweiterung zu einer verbesserten Modellanpassung führt.

### Forschungsfrage 1 – Adaption des TAM

In Abbildung 46 auf Seite 138 ist das hier verwendete adaptierte Technologieakzeptanzmodell als Konzeptmodell dargestellt, mit dessen Hilfe die zur Forschungsfrage 1 gehörenden Hypothesen statistisch überprüft werden sollen. In Anlehnung an Davis wird das Akzeptanzverhalten direkt durch die Intention vorhergesagt, die wiederum durch die beiden Variablen ‚wahrgenommener persönlicher Nutzen‘ und ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ beeinflusst wird. In der Erweiterung des TAM durch Venkatesh und Davis (2000) wird der erwartete Nutzen seinerseits durch die unabhängige Variable ‚persönliche Relevanzeinschätzung‘ sowie die für diese Studie zum ‚erwarteten Nutzen für Schülerinnen und Schüler‘ uminterpretierten Faktoren ‚Outputqualität‘ und ‚Nachweisbarkeit der Ergebnisse‘ beeinflusst.

In Abbildung 47 ist das Ergebnis der statistischen Modellberechnung zu finden. Die Analyse des Modells nach den in Abschnitt 6.2.1.2 beschriebenen Fit-Indizes hat für dieses Modell ergeben, dass der CMIN/DF mit 2.106 in einem guten Fit-Bereich liegt, zudem ist der RMSEA mit .08 für die gegebene Stichprobengröße ebenfalls in einem Bereich (<.08), für den das Modell als gut angenommen werden kann. Lediglich der CFI liegt mit .80 unterhalb der Grenze zum guten Fit-Bereich von .95 und befindet sich im Bereich der moderaten Fit-Qualität. Insgesamt besitzt dieses Modell zufriedenstellende Fit-Indizes, da zwei der drei partiellen Gütekriterien über deren theoretisch begründeten Schwellenwerten liegen. Ferner konnten mit dem adaptierten Technologieakzeptanzmodell die theoretisch erwarteten Wirkzusammenhänge fast komplett erwartungskonform modelliert werden. Die Ergebnisse stehen damit auch im Einklang mit zahlreichen Studien (z.B. F. D. Davis, 1989; Venkatesh & Davis, 2000; B. Wu & Zhang, 2014).

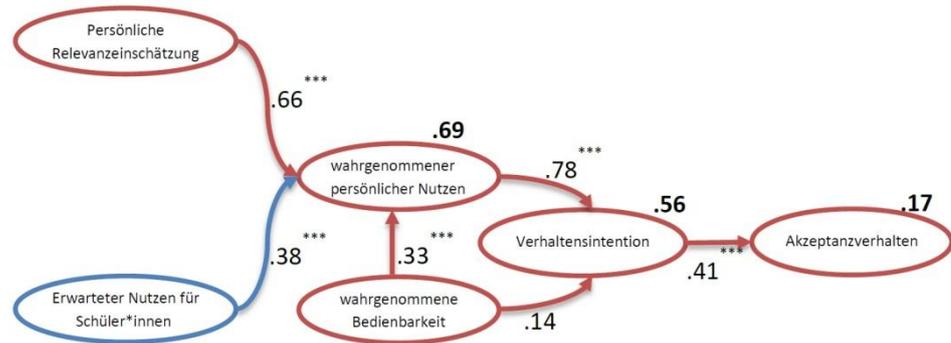


Abbildung 47: Adaptiertes TAM2-Modell (statistisches Modell)

Es konnte nachgewiesen werden, dass der ‚erwartete persönliche Nutzen‘ ein sehr starker Prädiktor für die Verhaltensintention (H5,  $\beta = .781, C.R. = 7.901, p < .001$ ) ist. Der ‚erwartete persönliche Nutzen‘ wird wiederum sehr stark (H4,  $\beta = 0.659, C.R. = 7.036, p < .001$ ) von der persönlichen Relevanzeinschätzung und vom ‚erwarteten Nutzen für Schülerinnen und Schüler‘ (H3,  $\beta = .380, C.R. = 5.010, p < .001$ ) beeinflusst. Bestätigen lässt sich auch die Beeinflussung des ‚wahrgenommen persönlichen Nutzen‘ durch die ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ (H2,  $\beta = 0.328, C.R. = 3.648, p < .001$ ). Auch die im UTAUT-Modell vorhergesagte Wirkung der Verhaltensintention auf das Akzeptanzverhalten lässt sich erwartungskonform bestätigen (H6,  $\beta = .410, C.R. = 4.620, p < .001$ ). Lediglich Hypothese 1:, wonach die wahrgenommene Bedienbarkeit von Multimediaanwendungen einen Einfluss auf die Verhaltensintention ausübt, kann nicht bestätigt werden, da hier kein signifikanter Zusammenhang festgestellt wurde. Dieser Befund steht jedoch im Einklang mit anderen Studien (vgl. F. Davis et al., 1992; Horton et al., 2001; Olbrecht, 2010).

Mit dem adaptierten Technologieakzeptanzmodell können die theoretisch erwarteten Kausalzusammenhänge nachgewiesen werden. Die  $\beta$ -Gewichte der Wirkzusammenhänge des TAM2/UTAUT-Modells ( $ePersNutz \rightarrow VHI: \beta = .78$  vgl.  $\beta = .55$ ;  $wBed \rightarrow VHI: \beta = .14$  vgl.  $\beta = .17$   $VHI \rightarrow AKV: \beta = .41$  vgl.  $\beta = .52$ ) liegen jeweils im Bereich von Venkatesh und Davis (2000, S. 196–197). Außerdem passen die  $R^2$ -Werte sehr gut zu denen früherer Studien ( $ePersNutz: R^2 = 69\%$  vgl.  $R^2 = 60\%$ ;  $VHI: R^2 = 56\%$  vgl.  $37\% < R^2 < 52\%$ ). Alleine der  $R^2$ -Wert für das Akzeptanzverhalten liegt außerhalb der Bandbreite ( $R^2 = 17\%$  vgl.  $44\% < R^2 < 57\%$ ) von Venkatesh und Davis (2000, S. 196–197). Insgesamt gesehen deuten die Ergebnisse darauf hin, dass das adaptierte Modell gut zum Erhebungsinstrument passt und für zukünftige Erhebungen verwendet werden kann.

Tabelle 20 zeigt zusammenfassend, dass alle Hypothesen mit Ausnahme von Hypothese 1: bestätigt werden können.

**Tabelle 20: Forschungsfrage 1 – Untersuchungshypothesen (Teilstudie 1)**

Hypothese 1:	Die wahrgenommene Bedienbarkeit von Multimediaanwendungen beeinflusst die Verhaltensintention (VHI), diese auch im Unterricht einzusetzen. Je einfacher und intuitiver die Bedienung einer Anwendung wahrgenommen wird, desto größer ist die Intention, zukünftig die Anwendung zu nutzen.	nicht bestätigt
Hypothese 2:	Der wahrgenommene persönliche Nutzen von Multimediaanwendungen wird von der wahrgenommenen Bedienbarkeit der Anwendung beeinflusst. Je einfacher und intuitiver die Bedienung der Anwendung von einer Person wahrgenommen wird, desto positiver wird der Nutzen eingeschätzt, den die Anwendung der Lehrkraft bietet.	bestätigt
Hypothese 3:	Der erwartete Nutzen einer Multimediaanwendung für Schülerinnen und Schüler hat einen direkten Einfluss auf den wahrgenommenen persönlichen Nutzen, den eine Lehrkraft in einer Multimediaanwendung sieht. Hohe Werte auf der Skala des von einer Lehrkraft erwarteten Nutzens einer Multimediaanwendung für Schülerinnen und Schüler führen dazu, dass eine Lehrkraft den persönlichen Nutzen einer Multimediaanwendungen höher einschätzt.	bestätigt
Hypothese 4:	Der wahrgenommene persönliche Nutzen von Multimediaanwendungen wird von der persönlichen Relevanzeinschätzung der Anwendung beeinflusst. Je relevanter eine Lehrkraft eine Anwendung einschätzt, desto positiver wird der Nutzen ebendieser empfunden.	bestätigt

Hypothese 5: Der wahrgenommene persönliche Nutzen der Multimediaanwendung beeinflusst die Verhaltensintention. Je höher der persönliche Nutzen der Multimediaanwendung von einer Lehrkraft eingeschätzt wird, desto stärker ist die Absicht ausgeprägt, zukünftig eine Multimediaanwendung einzusetzen. **bestätigt**

Hypothese 6: Die Verhaltensintention hat einen direkten Einfluss auf das Akzeptanzverhalten gegenüber Multimediaanwendungen. Hohe Werte auf der Skala der Intention bilden dabei eine Voraussetzung für das tatsächliche Verhalten. **bestätigt**

Im UTAUT-Modell soll die Verhaltensintention auch als Mediatorvariable charakterisiert werden. Um zu überprüfen, ob es sich bei der Verhaltensintention tatsächlich um eine Mediatorvariable handelt, soll nach Urban und Mayerl (2018, 325 ff) überprüft werden, ob zusätzliche Wirkpfade zwischen den beobachteten unabhängigen Variablen und dem Akzeptanzverhalten vorliegen. Handelt es sich bei der Verhaltensintention um eine Mediatorvariable, ist zu erwarten, dass die zusätzlichen Pfade nicht signifikant sind und/oder nur eine geringe Ladung besitzen und dass keine wesentliche Verbesserung der Passung des Modells eintritt. Die Überprüfung erfolgt mit dem in Abbildung 48 dargestellten Konzeptmodell, das die zusätzlichen Pfade (lila) beinhaltet.

Die Ergebnisse dieser Modellrechnung fallen überraschend aus:

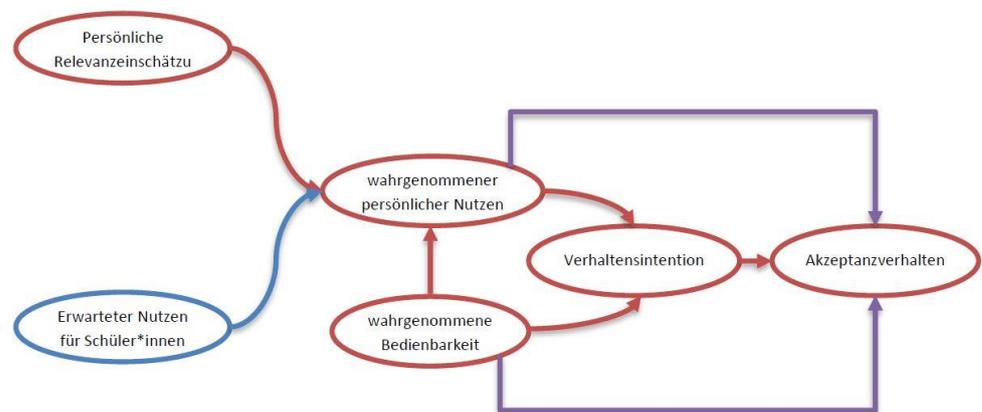


Abbildung 48: Mediatorstest für die Variable ‚Verhaltensintention‘

Das gewählte Mediatormodell (vgl. Abbildung 49) zeigt eine gute Passung an die Daten. Verglichen mit dem Ausgangsmodell sind die Verbesserungen signifikant ( $\Delta\chi^2 = 605.8; df = 366; p = .000$  zuvor:  $\Delta\chi^2 = 751.1; df = 369; p = .000$ ). Die zuvor verwendeten Fit-Indizes verbessern sich ebenfalls auf Werte für

- *CHMIN* = 2.0 (zuvor 2.1),
- *CFI* = .81 (zuvor .80) und
- *RMSEA* = .077 (zuvor .80).

Des Weiteren besitzt der direkte Pfad zwischen der unabhängigen Variable ‚wahrgenommener persönlicher Nutzen‘ und dem Akzeptanzverhalten eine hoch signifikante Ladung von 0.75. Gleichzeitig sinkt die Beziehung zwischen der Verhaltensintention und dem Akzeptanzverhalten auf ein nicht signifikantes Niveau von -.24. Lediglich die direkte Wirkung der Variable ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ auf das ‚Akzeptanzverhalten‘ ist bei einer Ladung von -.07 erwartungsgemäß nicht signifikant. Insgesamt stellt sich nach dem Mediator-test die Variable ‚wahrgenommener persönlicher Nutzen‘ als mit Abstand bedeutendster Einflussfaktor auf die Vorhersage des Akzeptanzverhaltens heraus. Die Varianzaufklärung der Variable ‚Akzeptanzverhalten‘ beträgt nun  $R^2 = .45$ , die Variable ‚Verhaltensintention‘ beträgt  $R^2 = .59$  und die Varianzaufklärung der Variable ‚wahrgenommener persönlicher Nutzen‘ beträgt sogar  $R^2 = .77$ .

Diese Ergebnisse widersprechen beinahe vollumfänglich den Kriterien, wonach die ‚Verhaltensintention‘ eine Mediatorvariable im betrachteten modifizierten UTAUT-Modell darstellt. Dies steht jedoch im Einklang mit diversen Studien, in denen ähnliche Zusammenhänge und Größenordnungen ermittelt wurden (Olbrecht, 2010; B. Wu & Zhang, 2014).

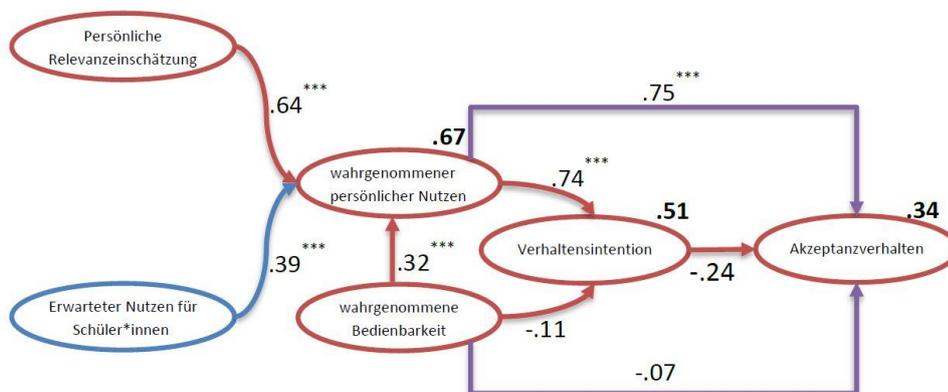


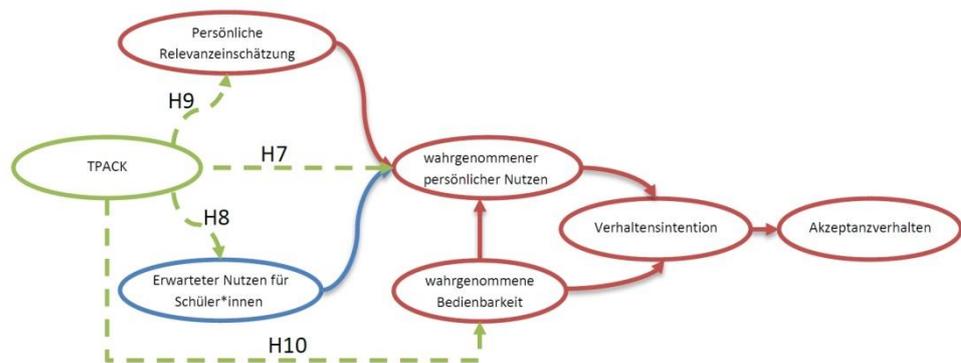
Abbildung 49: Mediator-test der Verhaltensintention im Basismodell (statistisches Modell)

**Forschungsfrage 2 – Erweiterung des UTAUT um den Einflussfaktor TPACK**

In Abbildung 50 ist das adaptierte UTAUT-Modell mit der Erweiterung um den Einflussfaktor TPACK als Konzeptmodell dargestellt, mit dessen Hilfe die zur Forschungsfrage 2 gehörenden Hypothesen statistisch überprüft werden sollen. Die bei der Beantwortung der Forschungsfrage 1 geltenden Rahmenbedingungen gelten auch hier. Dies bedeutet, dass ein direkter Einfluss des ‚erwarteten persönlichen Nutzens‘ und der ‚wahrgenommenen Bedienbarkeit‘ auf das ‚Akzeptanzverhalten‘ verboten ist. Die Einflussfaktoren wirken also auf den ‚erwarteten persönlichen Nutzen‘, nicht jedoch auf die ‚Verhaltensintention‘ oder das ‚Akzeptanzverhalten‘ an sich, sodass in Anlehnung an Davis (1989) das Akzeptanzverhalten direkt durch die Verhaltensintention vorhergesagt (mediert) wird, die wiederum durch die beiden Variablen ‚wahrgenommener persönlicher Nutzen‘ und ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ beeinflusst wird.

In Abbildung 52 ist das Ergebnis der statistischen Modellberechnung ersichtlich. Die Analyse des Modells nach den in Abschnitt 6.2.1.2 beschriebenen Fit-Indizes hat für dieses Modell ergeben, dass der CMIN/DF mit 1.92 in einem guten Fit-Bereich liegt. Zudem befindet sich der RMSEA mit .073 für die gegebene Stichprobengröße ebenfalls in einem Bereich ( $<.08$ ), für den das Modell als gut angenommen werden kann. Lediglich der CFI ist mit .79 unterhalb der Grenze zum guten Fit von .95 und befindet sich im Bereich der moderaten Fit-Qualität. Insgesamt besitzt auch das erweiterte Modell zufriedenstellende Fit-Indizes, da zwei der drei partiellen Gütekriterien über deren theoretisch begründeten Schwellenwerten liegen.

Insgesamt kann nachgewiesen werden, dass das TPACK einen sehr starken Einfluss auf die wahrgenommene Bedienbarkeit von Multimediaanwendungen ( $H_{10}, \beta = 0.761, C.R. = 3.962, p < .001$ ) hat. Ebenso besitzt das TPACK einen starken Einfluss auf den von der Lehrkraft eingeschätzten Nutzen von Multimediaanwendungen für Schülerinnen und Schüler ( $H_8, \beta = 0.471, C.R. = 3.780, p < .001$ ). Der Einfluss des TPACK auf die ‚persönliche



**Abbildung 50: Erweiterung des UTAUT um den Einflussfaktor TPACK (Konzeptmodell)**

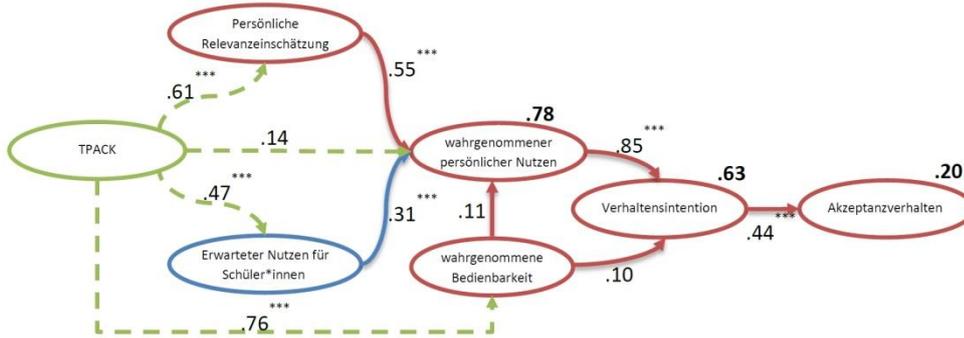


Abbildung 52: Erweiterung des UTAUT um den Einflussfaktor TPACK (statistisches Modell)

Relevanzeinschätzung' ist ebenfalls hoch signifikant ( $H9, \beta = 0.612, C.R. = 4,263, p < .001$ ). Lediglich der Einfluss des TPACK auf den ‚erwarteten persönlichen Nutzen‘ ( $H7, \beta = 0.142, C.R. = 1.019$ ) ist nicht signifikant und besitzt zudem eine niedrige Ladung.

Weiter kann festgestellt werden, dass auch in diesem Modell der ‚erwartete persönliche Nutzen‘ ein sehr starker Prädiktor für die Verhaltensintention ( $\beta = 0.845, C.R. = 7.923, p < .001$ ) ist. Der ‚erwartete persönliche Nutzen‘ wird wiederum sehr stark ( $\beta = 0.552, C.R. = 5.839, p < .001$ ) von der persönlichen Relevanzeinschätzung und vom ‚erwarteten Nutzen für Schülerinnen und Schüler‘ ( $\beta = 0.306, C.R. = 4.214, p < .001$ ) beeinflusst. Die wesentliche Achse im TAM2/UTAUT-Modell ‚erwarteter persönlicher Nutzen‘ -> ‚Verhaltensintention -> ‚Akzeptanzverhalten‘ ist insgesamt hoch signifikant und weist hohe Korrelationen ( $\beta = 0.845, C.R. = 7.923, p < .001$ . bzw.  $\beta = 0.443, C.R. = 5.118, p < .001$ ) auf.

Die Varianzaufklärung des Akzeptanzverhaltens liegt bei  $R^2 = 0.20$  ( $p < .001$ ) und für den ‚wahrgenommenen persönlichen Nutzen‘ bei  $R^2 = 0.78$  ( $p < .001$ ) und damit im Bereich des adaptierten UTAUT-Modells.

Zur Überprüfung der Hypothese 11: bedarf es einiger Modellmodifikationen, wie sie bereits zur Ermittlung des Mediatoreffekts in der Forschungsfrage 1 eingesetzt wurden. Dies bedeutet, dass die direkten Pfade zwischen den Variablen

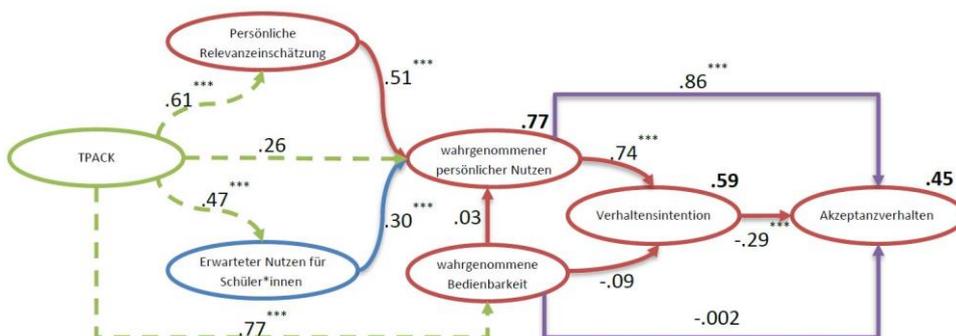
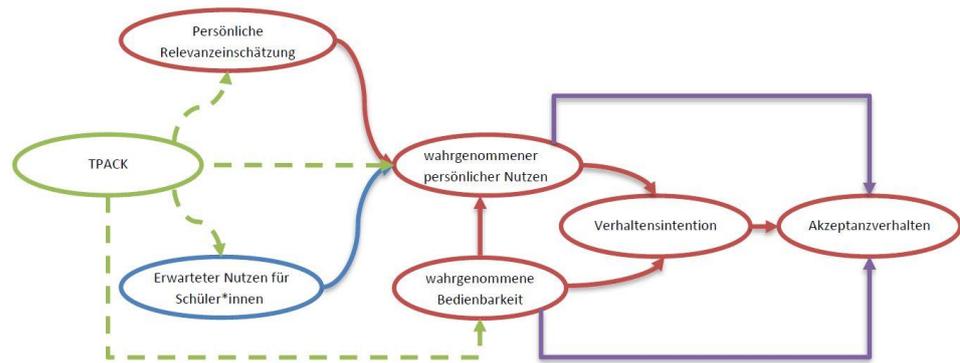


Abbildung 51: Erweitertes Modell mit zusätzlichen Wirkpfaden (statistisches Modell)



**Abbildung 53: Mediator-test zum erweiterten TAM2/UTAUT-Modell (Konzeptmodell)**

‚erwarteter persönlicher Nutzen‘ und ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ sowie dem Akzeptanzverhalten zugelassen werden. Abbildung 53 enthält das Konzeptmodell zum nun geplanten Vorgehen. Erwartet wird, dass die Verhaltensintention den Einfluss des TPACK auf das Akzeptanzverhalten vermittelt. Diese beiden Pfade sollten wiederum nicht signifikant sein und niedrige Pfadgewichte besitzen.

In Abbildung 51 ist das statistische Modell des um das TPACK erweiterten, adaptierten UTAUT-Modells mit den zusätzlich freigesetzten Pfaden dargestellt. Die Fit-Indizes haben sich durch die Zulassung der direkten Modellpfade durchwegs verbessert. So liegt der Wert für CMIN/DF nun bei 1.87 (vorher 1.92) und damit weiter deutlich im guten Fit-Bereich, zudem zeigt sich der RMSEA mit ,071 (vorher .073) verbessert und liegt damit für die gegebene Stichprobengröße weiter in einem Bereich (<.08), für den das Modell als gut angenommen werden kann. Auch der CFI ist mit .80 (vorher .79) gestiegen, liegt jedoch immer noch unterhalb der Grenze zum guten Fit von .95 und befindet sich damit weiter im Bereich der moderaten Fit-Qualität. Die Varianzaufklärung ändert sich für die Variable ‚Akzeptanzverhalten‘ deutlich, sodass nun 45 % der Varianz des Akzeptanzverhaltens durch die Variablen und durch die Verhaltensintention vorhergesagt werden können. Für die anderen Variablen ändert sich die Vorhersagekraft durch die Modellmodifikation nur unwesentlich (Verhaltensintention,  $R^2 = .63$ ; wahrgenommener persönlicher Nutzen,  $R^2 = .77$ ).

Die Werte der Strukturgewichte weisen darauf hin, dass die Annahme, dass die Verhaltensintention als Mediatorvariable auftritt, nicht bestätigt werden kann. Durch die Freisetzung der oben beschriebenen Pfade konnte ein signifikanter Effekt zwischen dem erwarteten persönlichen Nutzen und dem Akzeptanzverhalten ( $\beta = 0.864, C. R. = 5.018, p < 0.001$ ) nachgewiesen werden. Zwischen der wahrgenommenen Bedienbarkeit und dem Akzeptanzverhalten ( $\beta = 0.000, C. R. = -0.002, p < 0.998$ ) besteht hingegen

kein signifikanter Zusammenhang. Gleichzeitig nimmt der Einfluss der Verhaltensintention auf das Akzeptanzverhalten deutlich auf  $\beta = -0.293$  ab ( $C. R. = -2.101, p < 0.036$ ), ist jedoch weiterhin signifikant.

**Tabelle 21: Forschungsfrage 2 – Untersuchungshypothesen (Teilstudie 1)**

Hypothese 7:	Das TPACK beeinflusst den von einer Lehrkraft wahrgenommenen persönlichen Nutzen einer Multimediaanwendung. Besitzt eine Lehrkraft einen hohen Wert auf der TPACK-Skala, so nimmt diese die Nutzung von Multimediaanwendungen als gewinnbringend für sich selbst wahr.	nicht bestätigt
Hypothese 8:	Das TPACK beeinflusst den durch die Lehrkraft wahrgenommenen Schülernutzen einer Multimediaanwendung. Besitzt eine Lehrkraft einen hohen Wert auf der TPACK-Skala, so nimmt diese Lehrkraft die Nutzung von Multimediaanwendungen als gewinnbringend für ihre Schülerinnen und Schüler wahr.	bestätigt
Hypothese 9:	Das TPACK beeinflusst die persönliche Relevanzeinschätzung einer Lehrkraft gegenüber Multimediaanwendungen. Besitzt eine Lehrkraft einen hohen Wert auf der TPACK-Skala, so schätzt diese Multimediaanwendungen als relevant für ihre Lehrtätigkeit ein.	bestätigt
Hypothese 10:	Das TPACK hat einen direkten Einfluss auf die von der Lehrkraft wahrgenommene Bedienbarkeit einer Multimediaanwendung. Besitzt eine Lehrkraft einen hohen Wert auf der TPACK-Skala, so nimmt sie eine Multimediaanwendung als leicht zu bedienen wahr.	bestätigt
Hypothese 11:	Die Verhaltensintention tritt als Mediatorvariable zwischen dem von der Lehrkraft erwarteten persönlichen Nutzen von Multimediaanwendungen und dem Akzeptanzverhalten auf.	nicht bestätigt

---

Hypothese 12: Durch die Erweiterung des adaptierten **bestätigt** UTAUT-Modells um den Einflussfaktor TPACK kommt es zu keinen signifikanten Änderungen bei Wirkzusammenhängen im Vergleich zum Basismodell ohne den Einflussfaktor TPACK.

---

### 6.2.3 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse – Teilstudie 1

In dieser Studie wurden die Hypothesen der Forschungsfragen zum modifizierten UTAUT-Modell sowie dessen Erweiterung um den Einflussfaktor TPACK untersucht.

Das UTAUT-Modell wurde adaptiert und validiert. Die Ergebnisse passen zu den Ergebnissen der unadaptierten Modellvariante.

Forschungsfrage 1 widmete sich der Überprüfung des auf Multimediaanwendungen adaptierten UTAUT-Modells. Mit den Hypothesen werden die einzelnen Wirkzusammenhänge beschrieben, um das Technologieakzeptanzmodell auf Multimediaanwendungen in der Schule anzupassen und als Strukturmodell zu konzeptualisieren. Die Überprüfung der Annahmen erfolgte durch eine Reihe von Strukturgleichungsmodellen, die mit IBM AMOS 25 berechnet wurden. Im ersten Schritt wurde das Basismodell überprüft, in dem der ‚wahrgenommene persönliche Nutzen‘ und die ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ von Multimediaanwendungen, mediiert durch die Verhaltensintention (VHI), die Akzeptanz von Multimediaanwendungen vorhersagen sollen. Gemäß dieser Annahmen wurden, wie in Unterkapitel 5.1 beschrieben, nur die theoretisch begründeten Einflusspfade im Strukturgleichungsmodell zugelassen und berechnet. Dabei zeigte sich ein signifikanter Einfluss der Verhaltensintention auf das Akzeptanzverhalten, die Beeinflussung der Verhaltensintention konnte wiederum durch den ‚wahrgenommenen persönlichen Nutzen‘ und den Faktor ‚Einfachheit der Bedienung‘ bestätigt werden. Gleiches gilt für den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Variablen: Der Einfluss der wahrgenommenen Bedienbarkeit auf den von der Lehrkraft ‚wahrgenommenen persönlichen Nutzen‘ ist hoch signifikant, genauso wie der von der Lehrkraft ‚wahrgenommene Nutzen für Schülerinnen und Schüler‘ bzw. der ‚persönlichen Relevanzeinschätzung‘ und dem ‚wahrgenommenen persönlichen Nutzen‘.

Entgegen den Erwartungen und den Vorhersagen des TAM2/UTAUT-Modells ließ sich die Verhaltensintention jedoch nicht durch die ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ erklären. Dies scheint zunächst ein überraschendes Ergebnis zu sein. Mit Blick auf die Teilnehmer der Studie werden die Gründe für dieses Ergebnis jedoch greifbar. An der Studie nahmen ausschließlich Physiklehrer teil. Da Physiklehrer oft mit weniger intuitiven und wenig bedienerfreundlichen Softwarepaketen wie ‚Cassy Lab‘ von Leybold Didactic arbeiten müssen, scheint es, als messe die betrachtete Lehrerpoblution der einfachen Bedienbarkeit einer Anwendung keine allzu große Bedeutung bei. Stattdessen nutzen Physiklehrer auch Programme, die komplexer anzuwenden sind. Daher könnte die ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ nur einen geringen Einfluss auf die Verhaltensintention haben. Als Konsequenz ist dieser Modellpfad nicht mehr signifikant.

Einzig die Verhaltensintention ließ sich nicht durch die ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ erklären. Ein Grund hierfür könnte die spezielle Lehrergruppe (Physiklehrkräfte) sein.

Da im originalen TAM2/UTAUT-Modell die Variable ‚Verhaltensintention‘ als Mediatorvariable auftritt, wurde die Bedeutung der Verhaltensintention im Modell noch genauer untersucht. Zur Überprüfung wurde ein Strukturgleichungsmodell analysiert, bei dem die direkten Wirkungspfade zwischen dem Akzeptanzverhalten und den abhängigen Variablen (wahrgenommener persönlicher Nutzen; wahrgenommene Bedienbarkeit) zugelassen wurden. Erwartet wurden nichtsignifikante Beziehungen zwischen dem ‚wahrgenommenen persönlichen Nutzen‘ sowie der ‚wahrgenommenen Bedienbarkeit‘ und dem ‚Akzeptanzverhalten‘. Entgegen dieser Erwartung wurde eine direkte Vorhersage des ‚Akzeptanzverhaltens‘ durch den ‚wahrgenommenen persönlichen Nutzen‘ beobachtet. Dieser Zusammenhang ist statistisch bedeutsam.

Gleichzeitig veränderte sich der Einfluss der Intention auf das ‚Akzeptanzverhalten‘ unter dieser Bedingung auf eine unbedeutende Größe. Auf Basis der statistischen Ergebnisse muss die Mediatorhypothese für das adaptierte Modell zurückgewiesen werden. Dies steht zwar im Einklang mit anderen Studien (vgl. Olbrecht, 2010; B. Wu & Zhang, 2014), aber im Widerspruch zu F. Davis et al. (1992). Dies bedeutet, dass der ‚erwartete persönliche Nutzen‘ bei Weitem der größte Einflussfaktor für die Vorhersage des Akzeptanzverhaltens ist.

Untersuchung zusätzlicher Wirkzusammenhänge. Dabei wurde eine direkte Vorhersagbarkeit des ‚Akzeptanzverhaltens‘ durch den ‚wahrgenommenen persönlichen Nutzen‘ beobachtet. Durch das Hinzufügen des Faktors TPACK zum adaptierten Modell entstanden neue, hochsignifikante Wirkzusammenhänge: TPACK -> ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ TPACK -> ‚erwarteter persönlicher Nutzen‘ TPACK -> ‚persönliche Relevanzeinschätzung‘

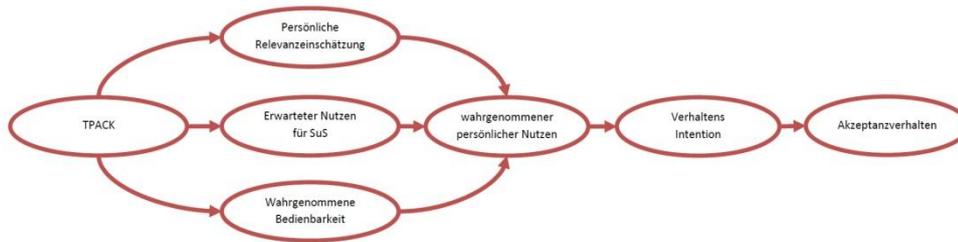
Um den Einfluss des technologisch-fachdidaktischen Wissens (TPACK) auf das Akzeptanzverhalten zu ermitteln, wurde das Basismodell um die unabhängige Variable TPACK erweitert. Dabei wurden Pfade zwischen dem TPACK und der ‚wahrgenommenen Bedienbarkeit‘, dem ‚erwarteten persönlichen Nutzen‘ und der ‚persönlichen Relevanzeinschätzung‘ hinzugefügt. Mit Ausnahme des Pfades ‚TPACK – wahrgenommener persönlicher Nutzen‘ sind alle Wirkzusammenhänge hoch signifikant und weisen hohe Faktorladungen auf.

TPACK ist übergeordnete Moderatorvariable

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von F. D. Davis (1986), wonach die Faktoren nur direkt auf den erwarteten Nutzen wirken dürfen, zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass die Variable TPACK als Faktor keinen direkten Einfluss auf den ‚wahrgenommenen persönlichen Nutzen‘ hat. Stattdessen wird deutlich, dass das TPACK außerhalb des von Davis vorgeschlagenen Rahmens als übergeordnete Moderatorvariable der Konstrukte ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘, ‚persönliche Job-Relevanzeinschätzung‘ und ‚wahrgenommener Nutzen für Schülerinnen und Schüler‘ steht. Lehrer mit einem starken TPACK verfügen demnach über ein ausgeprägtes technisches und pädagogisches Wissen. Sie besitzen auch fundierte Kenntnisse im Umgang mit Multimediaanwendungen im Klassenzimmer. Außerdem wissen sie, welche Möglichkeiten Multimediaanwendungen bieten und welchen Schülervorstellungen durch einen geeigneten Einsatz entgegengewirkt werden kann. Daher sehen Lehrkräfte mit einem hohen TPACK die Vorteile, die Schülerinnen und Schüler durch den Einsatz von Multimediaanwendungen im Unterricht erzielen können. Wie bereits erwähnt, hat diese Studie gezeigt, dass Lehrer mit einem hohen TPACK Multimediaanwendungen als relevanter für ihren Unterricht bewerten. Ein möglicher Grund dafür ist die bessere Einschätzung der Möglichkeiten, die Multimediaanwendungen für gezielten und schülerzentrierten Unterricht bieten. Wenn also eine Lehrkraft mehr Möglichkeiten sieht, eine Multimediaanwendung auch im Klassenzimmer zu verwenden, wird diese die Multimediaanwendung als für ihren Unterricht relevanter einschätzen. Dies wird noch verstärkt durch das Wissen darüber, wie Multimediaanwendungen und die damit verbundenen Unterrichtsmethoden spezifisch gegen bestimmte Schülervorstellungen in der Physik wirken können.

Der Mediatorrest des erweiterten, adaptierten Modells hat ergeben, dass die Verhaltensintention nicht als Mediatorvariable angesehen werden kann. Eine weitergehende Untersuchung ist daher nötig.

Auch für das erweiterte Modell wurde ein Mediatorrest für die Verhaltensintention durchgeführt, der analoge Ergebnisse wie beim Basismodell hervorgebracht hat. Demnach ist auch hier zu konstatieren, dass die Verhaltensintention nicht als Mediatorvariable angesehen werden kann. Dieses irritierende Ergebnis führt zu einem uneinheitlichen Bild des Basismodells und des erweiterten Modells zur Akzeptanzvorhersage von Multimediaanwendungen im Physikunterricht. Da die Mediatorrolle nicht nachgewiesen werden kann, obwohl das Modell insgesamt gut passt, ist daraus zu folgern, dass zur Vorhersage des Akzeptanzverhaltens die Verhaltensintention keinen oder nur einen geringen Erklärungsbeitrag liefert. Um dieses unerwartete Verhalten aufzuklären, sind jedoch weitergehende Untersuchungen nötig.

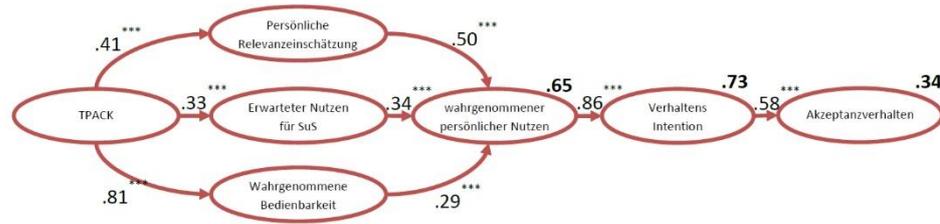


**Abbildung 54: Reduziertes Technologieakzeptanzmodell**

Auf Basis aller Ergebnisse und der vorausgehenden Überlegung zur Verhaltensintention wird ein Modell vorgeschlagen, das eine Adaption des TAM2/UTAUT auf den Kontext Schule in Bezug auf Multimediaanwendungen darstellt. Abbildung 54 enthält das hieraus resultierende Konzeptmodell zur Erklärung des Akzeptanzverhaltens. Dabei sind die Variablen ‚wahrgenommener Nutzen für Schülerinnen und Schüler‘, ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ und ‚persönliche Relevanzeinschätzung‘ abhängige Variablen, die als Moderatorvariablen des ‚erwarteten persönlichen Nutzens‘ auftreten. Diese Moderatorvariablen besitzen das TPACK als starken Einflussfaktor. Der wesentliche Unterschied zur Teilstudie 2 besteht darin, dass für das TPACK nun kein direkter Einfluss mehr auf den ‚erwarteten persönlichen Nutzen‘ angenommen wird.

Für dieses Modell sprechen auch einige didaktische Indizien. So haben Lehrkräfte mit einem ausgeprägten TPACK in der Regel neben einem hervorragenden Technologie- und pädagogischen Wissen auch ein ausgeprägtes Wissen darüber, wie sie etwaige Technologien im Unterricht einsetzen können. Sie sehen Vorteile für Schülerinnen und Schüler bei einem gezielten Einsatz von Multimediaanwendungen, was diese für ihre Arbeit relevant macht. Durch ein ausgeprägtes technologisches Wissen (TK) können diese Lehrkräfte auch die Bedienbarkeit von Multimediaanwendungen einschätzen, sodass sie in der Lage sind, entsprechende Anwendungen auszuwählen, die für Schülerinnen und Schüler nützlich sind. Das TPACK tritt hier also als vorgeordnete Moderatorvariable der Designfeatures auf, die nur mittelbar einen Einfluss auf den ‚wahrgenommenen persönlichen Nutzen‘ besitzt. Zur Validierung dieses Modells wurden die Daten der Teilstudie 2 herangezogen. Dieses Vorgehen wurde deshalb gewählt, da es organisatorisch schwierig ist, erneut eine vergleichbar große, neue Stichprobe an Physiklehrkräften zu akquirieren. Das berechnete Strukturgleichungsmodell weist gute Fit-Indizes (CHMIN/df: 1.9; RMSEA: .072; CFI: .79) auf und ist, wie in Abbildung 55 dargestellt, in der Lage, 34 % der Varianz des Akzeptanzverhaltens zu erklären. Durch die Reduktion des um den Faktor TPACK erweiterten adaptierten TAM2/UTAUT-Modells kommt es nicht nur zu einer deutlichen Verbesserung der Fit-Indizes, sondern auch zu einer großen Steigerung der Varianzaufklärung von 20 % auf jetzt 34 %.

Das auf Basis der Ergebnisse dieser Studie und weiterer didaktischer Indizien reduzierte Modell zeigt, dass das TPACK einen wesentlichen Einfluss auf das Akzeptanzverhalten nimmt. Gleichzeitig wird die durch das nun reduzierte Modell aufgeklärte Varianz um 70 % im Vergleich zum ursprünglich adaptierten und erweiterten UTAUT-Modell gesteigert.



**Abbildung 55: Reduziertes adaptiertes Technologieakzeptanzmodell (statistisches Modell)**

Insgesamt weisen die Ergebnisse dieser Studie in die gleiche Richtung wie die Ergebnisse von Young et al. (2018). Diese zeigten an Lehramtsstudierenden, dass das TPACK einen Einfluss auf den ‚erwarteten Nutzen‘ und die ‚wahrgenommene Bedienbarkeit‘ hat. Zudem wiesen sie einen Einfluss des TPACK auf die ‚wahrgenommene Selbstwirksamkeit‘ nach. Der Einfluss des TPACK auf den ‚erwarteten Nutzen‘ ist dort jedoch ebenfalls vergleichsweise gering. Der Einfluss auf die erwartete Bedienbarkeit liegt gleichwohl auf einem sehr ähnlichen Niveau. Die Unterschiede zwischen Young et al. (2018) und der vorliegenden Studie können aus einer unterschiedlichen Wahrnehmung von Lehramtsstudierenden und praktizierenden Lehrkräften resultieren. So erscheint es sinnvoll, anzunehmen, dass für praktizierende Lehrkräfte der eingeschätzte Nutzen einer Technologie und insbesondere einer Multimediaanwendung verstärkt davon abhängt, welchen Nutzen eine Lehrkraft in deren Verwendung für Schülerinnen und Schüler sieht. Die damit einhergehende Reduktion des Einflusses des TPACK auf den ‚wahrgenommenen persönlichen Nutzen‘ deckt sich dann wieder mit den Ergebnissen dieser Studie. Dennoch können durch die vorliegende Studie die Ergebnisse von Young et al. (2018) bestätigt und gleichzeitig um eine Perspektive erweitert werden.

Das in Abbildung 55 visualisierte Modell stellt demnach ein praktikables Modell zur Vorhersage des Akzeptanzverhaltens von Multimediaanwendungen im Physikunterricht dar. Es kann genutzt werden, um die Effektivität von Lehreraus- und Lehrerfortbildungsveranstaltungen hinsichtlich der Steigerung des Akzeptanzverhaltens von Multimediaanwendungen zu untersuchen, deren Weiterentwicklung zu unterstützen und so einen Beitrag zur Qualitätssteigerung von Aus- und Fortbildungsveranstaltungen zu leisten. In Teilstudie 2 wurde ebendies getestet.

### 6.3 Teilstudie 2 – Fortbildungsveranstaltung

Digitale Technologien und insbesondere multimediale Inhalte können bei geeignetem Einsatz einen starken positiven Einfluss auf den Lernerfolg von Schülerinnen und Schülern haben. So ist durch verschiedene Studien belegt, dass Lernende den Einsatz von Multimedia im Unterricht nicht nur akzeptieren, sondern sogar explizit bevorzugen (Buzzard et al., 2011). Jedoch setzen Lehrkräfte Multimedia scheinbar nur zaghaft im Unterricht ein. Hierfür nennen Idcgatekiva und Lindner (2015) verschiedene Gründe, beispielsweise Zeitmangel und eine zu geringe Erfahrung im Umgang mit Multimedia im Unterricht. Gleichzeitig wurde in jener Studie herausgefunden, dass Lehrkräfte die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten nicht voll ausschöpfen. Idcgatekiva und Lindner (Idcgatekiva & Lindner, 2015) folgern daraus, dass Lehrkräfte eine bessere Ausbildung im Umgang mit Multimedia benötigen. Ferner zählen sie fehlendes Wissen über die Einsatzmöglichkeiten von Multimediaanwendungen im Unterricht sowie deren pädagogische und fachliche Wirkung auf einen individuellen Lernenden als Ursachen für die nur geringe Einbindung von Multimedia im Unterricht auf.

#### 6.3.1 Welches Wissen benötigen Lehrkräfte hinsichtlich Multimediaanwendungen?

Aus der Lehr-Lern-Psychologie liegen fundierte Grundkonzepte vor, wie Multimedia und digitale Medien gewinnbringend im Unterricht eingesetzt werden können (z. B. (Issa et al., 2011; R. E. Mayer, 2009; R. Mayer, 2014)). Es darf jedoch die Frage gestellt werden, inwieweit die Erkenntnisse der Bildungsforschung bereits Einzug in den Alltag von Lehrkräften gehalten haben. Denn Eitel, Dersch und Renkl zeigen in ihrer Studie, dass selbst bei angehenden Lehrkräften, unabhängig von Fächerprofil und Studienfortschritt, Fehlkonzepte und spezifische Wissenslücken bezüglich der Funktionen von Multimedia zur Unterstützung von Lehr-Lern-Prozessen bestehen (Eitel et al., 2019). Sie regen daher an, dass im Rahmen von Aus- und Fortbildungsveranstaltungen das Wissen über kognitive Bildfunktionen vermittelt sowie der Abbau der gefundenen Fehlkonzepte angestrebt werden sollten (ebd.).

Damit eine Lehrkraft einen geeigneten Lehr-Lern-Prozess anstoßen kann, wird auch Wissen darüber benötigt, welche Auswirkungen die Wahl eines bestimmten Mediums auf die Schülerinnen und Schüler hat. Denn diese Wahl übt einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der kognitiven Belastung aus, die ein Schüler bzw. eine Schülerin verspürt. Chandler und Sweller (1991) sowie Sweller (1994) beschreiben dies in ihrer *Cognitive Load Theory*. Sie betonen dabei die Grenzen des Arbeitsgedächtnisses als bedeutenden Faktor, der bei der Unterrichtsgestaltung zu berücksichtigen sei. Sweller (2002), aber auch Mayer

(2002, 2009) sprechen deshalb Handlungsempfehlungen zur Gestaltung von multimedialen Lernmaterialien aus, um die externe kognitive Belastung beim Lernvorgang zu reduzieren. Das Wissen über die Wirkungen und damit einhergehende Belastungen sollten deshalb ein wesentlicher Teil von Fortbildungen sein (vgl. Kollar & Fischer, 2018). Die kognitive Belastung wird neben dem Inhalt auch durch das Design von Inhalten und Anwendungen (*Extraneous Cognitive Load*) beeinflusst. Koh und Chai (Koh & Chai, 2016) unterstreichen die Notwendigkeit, das Design der Lernmaterialien als Teil der Integrationskompetenz von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) zu betrachten. Dies umfasst insbesondere die Kenntnisse über Designkriterien nach Mayer (vgl. Abschnitt 4.3.3). Für die Fortbildung von Lehrkräften ist es daher sinnvoll, Beispiele für unterschiedliche Integrationsstrategien und Einsatzkonzepte zur Verfügung zu stellen. Comi, Argentine, Gui, Origo und Pagani (Comi et al., 2017) weisen in diesem Zusammenhang auf die Relevanz theoretisch fundierter und in der Praxis gut realisierbarer Einsatzszenarien hin, die zeigen können, wie IKT in Klassenräumen effektiv und zielorientiert einzusetzen sind. Darüber hinaus machen Jen, Yeh, Hsu, Wu und Chen (Jen et al., 2016) darauf aufmerksam, wie bedeutsam es sei, aus dem praktischen Unterrichtseinsatz von Technologien zu lernen, um den naturwissenschaftlichen Unterricht zu unterstützen. Fullan (Fullan, 2016) gibt jedoch zu bedenken, dass es sehr schwierig und zeitintensiv sei, aktuelle Ergebnisse aus der Bildungsforschung tatsächlich in den Unterricht zu integrieren, ausgenommen beispielsweise der Plattform ‚Clearing-House‘ der TU-München. Er analysiert verschiedene Faktoren, die den Bildungswandel beeinflussen können. Die Bildungsforschung sei jedoch nur eine davon. Hauptsächlich konzentriert er sich dabei auf lokale Faktoren, mit denen Lehrerinnen und Lehrer beinahe täglich konfrontiert werden, wie Kollegen, Schulbehörden, Eltern o. Ä. Guskey (Guskey, 2002) erachtet Lehrerzeitschriften als besonders wichtig, um Lehrkräfte zu erreichen. Er weist aber auch darauf hin, dass diese dann spezifische, konkrete und praktische Ideen bieten müssten, die in einem direkten Zusammenhang mit den täglichen Aktivitäten in den Klassenräumen stehen (Babusiaux et al., 2018). Zu diesem Thema bieten Girwidz und Kollegen (Girwidz et al., 2019) einen Überblick über Artikel zum Einsatz von Multimedia im Physikunterricht, die in europäischen Lehrerzeitschriften erschienen sind.

### **6.3.2 Forschungsfragen und Hypothesen**

Fortbildungen zum Einsatz digitaler Medien werden von verschiedenen Institutionen der Lehrerbildung angeboten und von Lehrkräften zahlreich besucht (vgl. (Sailer et al., 2017)). Welche Wirkung die Fortbildungen erzielen, wird aber nur selten erfasst. Oftmals werden nur die Fortbildungen selbst evaluiert, wobei

die Zufriedenheit der Teilnehmenden erfragt wird (ebd.). Die Frage, ob sich durch die Fortbildung das Wissen der Teilnehmenden und ihre Einstellung gegenüber den Inhalten der Fortbildung verändern, bleibt hingegen meist unberücksichtigt.

Aus diesem Grund werden in dieser Studie folgende Forschungsfragen untersucht:

### **Forschungsfrage 3**

*Steigert eine Fortbildung zu Multimedia im Physikunterricht das TPACK der Lehrkräfte?*

Diese Fragestellung kann nur dann zustimmend beantwortet werden, wenn sich die folgende Hypothese verifizieren lässt:

Hypothese 13: Eine Fortbildung zu Multimedia im Physikunterricht führt im Mittel zu einer Steigerung des Lehrer-TPACK.

### **Forschungsfrage 4 A**

*Steigert eine Fortbildung zu Multimedia im Physikunterricht die Akzeptanz einer Lehrkraft gegenüber Multimediaanwendungen?*

Diese Fragestellung kann nur dann zustimmend beantwortet werden, wenn sich die folgende Hypothese verifizieren lässt:

Hypothese 14: Eine Fortbildung zu Multimedia im Physikunterricht führt im Mittel zu einer Steigerung der Akzeptanz.

### **Forschungsfrage 4 B**

*Inwieweit ist die Steigerung der Akzeptanz einer Lehrkraft gegenüber Multimediaanwendungen durch eine Fortbildung abhängig vom TPACK und der Akzeptanz vor der Intervention?*

Diese Fragestellung kann nur dann zustimmend beantwortet werden, wenn sich die folgende Hypothese verifizieren lässt:

Hypothese 15: Unter kontrollierter Akzeptanz vor der Intervention bilden sich TPACK-Vorerfahrungsgruppen aus, die sich in der Akzeptanzentwicklung unterscheiden.

### 6.3.3 Methodik

In dieser Teilstudie soll überprüft werden, ob die in Abschnitt 5.2.1 beschriebene Fortbildungsveranstaltung beim TPACK und beim Akzeptanzverhalten eine Änderung hervorruft. Zur Ermittlung von Unterschieden von Skalenmittelwerten bietet sich der t-Test als statistisches Hilfsmittel an. Da es sich beim Untersuchungsdesign um ein Prä-Post-Design handelt, sind die Daten der beiden Messzeitpunkte nicht unabhängig, sodass der t-Test für abhängige Stichproben herangezogen werden muss. Mittels eines t-Tests wird dabei untersucht, ob ein nachgewiesener Mittelwertsunterschied rein zufällig entstanden ist oder ob es einen tatsächlich bedeutsamen Unterschied zwischen den beiden betrachteten Messzeitpunkten gibt. Für den Einsatz des t-Tests sind verschiedene Voraussetzungen zu prüfen. Falls diese nicht erfüllt sein sollten, steht als Alternative der Wilcoxon-Test (w-Test) zur Verfügung, bei dem beispielsweise keine Normalverteilung der Daten vorausgesetzt wird.

#### 6.3.3.1 Erhebungsinstrumente

Prä- und Post-Test waren hinsichtlich der Fragen zum Akzeptanzverhalten (TAM) und TPACK identisch.

*TPACK.* Die verwendeten Items für die TPACK-Skalen stammten aus etablierten Instrumenten von An und Reigeluth (An & Reigeluth, 2012), Archambault und Crippen (L. Archambault & Crippen, 2009) sowie Graham und Kollegen (C. Graham et al., 2009). Die Items wurden ins Deutsche übersetzt und geringfügig adaptiert (siehe Tabelle 7 bis Tabelle 19).

*TAM.* Die Items für die TAM-Skalen wurden aus einer Version des Erhebungsinstruments von Venkatesh und Davis (2000) adaptiert. Dazu wurden alle Items an den Kontext multimedialer Anwendungen im Physikunterricht angepasst. Beispielsweise wurde das Item ‚Die Nutzung des Systems verbessert meine Arbeitsleistung.‘ zu ‚Die Nutzung von Multimediaanwendungen verbessert meine Lehrleistung.‘ umformuliert.

Die Erhebung von TAM und TPACK bestand schließlich aus 74 Items, wobei jedes die folgenden Antwortkategorien aufwies: (1) ‚Ich stimme voll und ganz zu‘, (2) ‚Ich stimme zu‘, (3) ‚weder noch‘, (4) ‚Ich stimme nicht zu‘, (5) ‚Ich stimme überhaupt nicht zu‘. Tabelle 7 bis Tabelle 19 enthalten Kennwerte zu den Items der Skalen, die zur Beantwortung der Forschungsfragen beitragen.

#### 6.3.3.2 Analyseverfahren

Zunächst wurden nichtparametrische asymptotische Wilcoxon-Tests (vgl. Abschnitt 6.3.3.3 bis 6.3.3.4) für verbundene Stichproben berechnet, um Änderungen im TPACK und in der Akzeptanz bestimmen zu können.

Danach erfolgte eine K-Means-Clusteranalyse, um Gruppen von Probanden mit jeweils ähnlich ausgeprägten Vorerfahrungen vor der Fortbildung aufzudecken. Für diese drei entdeckten Cluster wurden iterativ die Clusterzentren/Mittelwerte so bestimmt, dass sie maximal voneinander entfernt sind (siehe (Bacher, 2001)).

Anschließend wurden die metrischen Skalen z-standardisiert. Die Daten wurden danach mittels ANCOVA ausgewertet. In die ANCOVA ging als abhängige Variable die Akzeptanz gegenüber Multimediaanwendungen nach der Fortbildung ein. Fester Faktor war die Variable ‚Cluster‘ mit den drei Subgruppen (1) ‚erfahren‘, (2) ‚mittelmäßig erfahren‘ und (3) ‚unerfahren‘. Die Akzeptanz von Multimedia vor der Intervention ging als Kovariate in das Modell ein.

### 6.3.3.3 Der t-Test für abhängige Stichproben zur Ermittlung der Signifikanz eines Mittelwertunterschiedes zwischen Prä- und Post-Test

Der t-Test gehört zu den parametrischen Verfahren, mit denen Populationsparameter „mittels statistischer Kennwerte wie dem arithmetischen Mittel oder der Varianz“ (Rasch et al., 2014a, S. 34) mathematisch begründet ermittelt werden. Der t-Test liefert dann eine Entscheidungshilfe dafür, ob ein ermittelter Unterschied der Mittelwerte zufällig entstanden ist, oder ob der Unterschied der Mittelwerte der beiden betrachteten Gruppen tatsächlich statistisch bedeutsam ist.

Grundlage der Interpretation ist der t-Wert, der nach Rasch et al. (2014a) durch

$$t_{df} = \frac{\text{empirische Mittelwertdifferenz} - \text{theoretische Mittelwertdifferenz}}{\text{geschätzter Standardfehler der Mittelwertdifferenz}}$$

berechnet wird. Da die Nullhypothesen so angenommen werden, dass es keinen Unterschied geben darf, ist die ‚theoretische Mittelwertdifferenz‘ gleich 0. Es ergibt sich also:

$$t_{df} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\hat{\sigma}_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}}$$

Mit Hilfe dieses t-Werts kann einer „empirisch ermittelten Mittelwertdifferenz eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden, mit der dieser oder ein größerer t-Wert unter der Annahme der Nullhypothese auftritt“ (Rasch et al., 2014a, S. 38). Der exakte Wert des t-Werts hängt dabei stark von der Anzahl der Freiheitsgrade ab. Dabei gilt: Je größer  $df$ , desto breiter ist die t-Verteilung und desto unwahrscheinlicher wird es, dass ein empirisch ermittelter Mittelwertunterschied zufällig auftritt. Mit dieser Wahrscheinlichkeit lässt sich nun eine Aussage über die Annahme oder Ablehnung der Nullhypothese treffen, nicht jedoch darüber, wie groß der Unterschied zwischen den Mittelwerten zu den Zeitpunkten 1 und 2

überhaupt sein könnte. Für derartige Abschätzungen wird schließlich das Maß der Effektstärke benötigt.

### **6.3.3.4 Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test als Alternative zum t-Test**

Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test oder W-Test ist ein parameterfreier Ersatz für den t-Test für abhängige Stichproben. Er wird dann eingesetzt, wenn die Voraussetzungen für den t-Test nicht erfüllt sind. Wie in Abschnitt 6.3.3.3 erläutert, sind die Voraussetzungen für den t-Test zwar bei der Betrachtung des TPACK erfüllt, bei der Betrachtung des Akzeptanzverhaltens (AKV) hingegen liegt keine Normalverteilung vor. Damit darf der t-Test für den Vergleich des AKV der beiden Messzeitpunkte nicht verwendet werden. Deshalb wird auf den Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test zurückgegriffen. Der Wilcoxon-Test dient dabei ebenfalls der Überprüfung, inwieweit sich die zentrale Tendenz von zwei verbundenen Stichproben signifikant unterscheidet (Hirsig, 2001). Für die abhängige Variable muss dabei keine Normalverteilung vorliegen, sie sollte aber nach Hirsig (2001) zumindest ordinalskaliert sein.

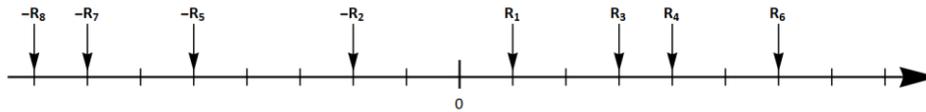
Der W-Test für abhängige Stichproben arbeitet mit der Analyse von Rangreihen. Die für die statistische Auswertung notwendigen Rangplätze erfolgen dabei nach Rasch et al. (2014b, S. 105) in vier Schritten:

Schritt 1 beinhaltet analog zum t-Test die Bildung von Differenzen der zu untersuchenden Variablen. Da in dieser Studie der Unterschied der Mittelwerte der jeweiligen Skalen untersucht werden soll, wird hier die Differenz der Mittelwerte verwendet.

Im zweiten Schritt werden die Beträge der einzelnen Differenzen bestimmt. Nulldifferenzen werden ignoriert und gehen nicht in die statistische Auswertung mit ein. Damit ist die Anzahl der ermittelten Rangplätze um die Anzahl der Nulldifferenzen zu reduzieren.

Im dritten Schritt werden die Beträge der Differenzen der Größe nach sortiert (beginnend mit der kleinsten von Null verschiedenen Differenz). Die einzelnen Ränge werden von der kleinsten Differenz betrachtet mit 1 startend durchnummeriert.

Im vierten Schritt werden die einzelnen Rangplätze, die zu einer negativen Differenz gehören, mit einem negativen Vorzeichen versehen. Dadurch entstehen sogenannte gerichtete Ränge (engl. *Signed Ranks*)



**Abbildung 56: Signed Ranks des W-Tests (eigene Schema-Darstellung nach Bühner, 2011, S. 186)**

Die nun erhaltenen Ränge bilden die Grundlage für die statistische Auswertung des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests.

Hier wird die Nullhypothese zum Vergleich zweier Testzeitpunkte so formuliert, dass bei einer Variable kein Unterschied zwischen den beiden betrachteten Messzeitpunkten besteht. Demnach sollte die Differenz zufällig zustande gekommen sein, und positiv wie negativ auftretende Ränge sollten ungefähr in der gleichen Häufigkeit vorkommen.

Für die statistische Auswertung wird nun die betragsmäßig kleinere Summe als W-Wert bezeichnet:

$$W = |\min(\Sigma R_+; \Sigma R_-)|$$

Der W-Wert wird dann mit einem von der Stichprobengröße und vom akzeptierten Signifikanzniveau abhängigen kritischen Wert  $W_{krit}$  verglichen. Da die Stichprobengröße in den drei betrachteten Gruppen jeweils zwischen 45 und 65 liegt, ergibt sich zusammen mit dem Signifikanzniveau von 1 % ein kritischer Wert von  $W_{krit} = 2,58$ . Mit dem Signifikanzniveau von 5 % ergibt sich ein kritischer Wert von  $W_{krit} = 1,96$ .

Analog zum t-Test lässt sich auch beim W-Test eine Effektstärke, der Korrelationskoeffizient  $r$ , ermitteln:

$$r = \left| \frac{W}{\sqrt{n}} \right|$$

Dabei ist  $n$  die Summe aus der Anzahl der eingehenden Differenzen aus dem Prä- und Post-Test. Für die Interpretation der erhaltenen Effektstärken wird auch beim W-Test die Kategorisierung von Cohen (1988, S. 79–80) verwendet. Demnach werden die Grenzwerte wie folgt festgelegt:

- $0,1 \leq r < 0,3$ : kleiner Effekt
- $0,3 \leq r < 0,5$ : mittlerer Effekt
- $0,5 \leq r < 1$ : großer Effekt

Auch hier lassen sich die Grenzen der Effektstärken nach Gignac und Szodorai (2016) auf Basis der Perzentildefinition wieder geringfügig anders setzen:

- $0,1 \leq r < 0,2$ : kleiner Effekt
- $0,2 \leq r < 0,3$ : mittlerer Effekt
- $0,3 \leq r < 1$ : großer Effekt

### **6.3.4 Ergebnisse – Teilstudie 2**

#### **Änderungen im TPACK und in der Akzeptanz (Forschungsfrage 3 und 4A)**

Es wurde vermutet, dass das TPACK der Lehrkräfte im Mittel nach der Fortbildung ansteigt. In den nichtparametrischen asymptotischen Wilcoxon-Tests für verbundene Stichproben gingen die Prä- und Post-Test-Ergebnisse der TPACK-Skala ein. Der Wilcoxon-Test ergab:  $z = -6.157$ ,  $p < .001$ ,  $n = 165$ , Cohens  $d = -1.084$ . Da der Betrag des  $z$ -Werts höher als der kritische Wert der  $z$ -Standardnormalverteilung ( $\pm 1.96$ ) ist, kann zusammengefasst gesagt werden, dass die zentralen Tendenzen zwischen den Prä- und Post-Ergebnissen hinsichtlich des TPACK signifikant verschieden waren. Dabei handelte es sich um einen starken Effekt (vgl. Lenhard & Lenhard 2016). Hypothese 13:, in der vermutet wurde, dass die Fortbildung im Mittel zu einer Steigerung des TPACK führt, kann somit bestätigt werden.

Bezüglich der Akzeptanz wurde vermutet, dass diese nach der Teilnahme an der Fortbildung im Mittel höher ausgeprägt ist als zuvor. Die Prä- und Post-Test-Ergebnisse des Akzeptanzverhaltens wurden in die Analyse des asymptotischen Wilcoxon-Tests für verbundene Stichproben aufgenommen. Das Ergebnis war nicht signifikant ( $z = -.284$ ,  $p = .776$ ,  $n = 165$ ). Hypothese 14: muss daher verworfen werden.

#### **Steigerung der Akzeptanz in Abhängigkeit von Vorerfahrungen (Forschungsfrage 4B)**

##### **Clusteranalyse**

Für die Clusteranalyse der Vorerfahrungen wurden die Ergebnisse der TPACK-Skala des Prä-Tests verwendet. Cluster 1 umfasste 65 Lehrkräfte mit ähnlich niedrigen Vorerfahrungen. In Cluster 2 befanden sich 56 Lehrkräfte mit mittelmäßig ausgeprägten und in Cluster 3 44 Lehrkräfte mit ähnlich hohen Vorerfahrungen.

Tabelle 22 zeigt für die Variablen ‚TPACK‘ und ‚Akzeptanz‘ u. a. die Mittelwerte der Cluster und jene der Gesamtstichprobe. Die Mittelwerte je Cluster streuen um den Gesamtmittelwert.

**Tabelle 22: Mittelwerte und Standardabweichungen der Cluster hinsichtlich Vorerfahrungen**

	<b>Cluster 1 (unerfahren) n = 65</b>		<b>Cluster 2 (mittelmäßig erfahren) n = 56</b>		<b>Cluster 3 (erfahren) n = 44</b>		<b>Gesamte Stichprobe n = 165</b>	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
<b>TPACK vor der Fortbildung</b>	2.522	.082	3.098	.735	3.598	.751	3.005	.885
<b>TPACK nach der Fortbildung</b>	2.990	.953	3.517	.795	3.834	.544	3.394	.875
<b>Akzeptanz vor der Fortbildung</b>	2.066	.576	3.155	.279	4.279	.479	3.026	1.004
<b>Akzeptanz nach der Fortbildung</b>	2.145	.568	3.181	.494	3.953	.820	2.979	.963

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der explorativen Clusteranalyse deuten darauf hin, dass in allen drei Clustern das TPACK nach der Fortbildung im Mittel höher ausfiel als vor der Fortbildung, was ebenfalls durch die Ergebnisse des Wilcoxon-Tests in Abschnitt 5.1 gestützt wird. Ein anderes Bild zeigen aber die Werte für die Akzeptanz gegenüber Multimediaanwendungen. In Cluster 1 stieg sie an. In Cluster 2 blieb sie nahezu unverändert und in Cluster 3 sank die Akzeptanz. Dies könnte ein Grund für das nicht signifikante Ergebnis des Wilcoxon-Tests aus Abschnitt 5.2 sein. Beim zuvor durchgeführten Wilcoxon-Test wurden die zentralen Tendenzen der gesamten Stichprobe unabhängig von den Vorerfahrungen betrachtet. Unterschiedliche Entwicklungen könnten sich hier gerade aufgehoben haben. Daher ist es sinnvoll, mögliche Unterschiede in der Akzeptanzentwicklung zwischen den Vorerfahrungsgruppen mittels einer ANCOVA zu untersuchen.

**ANCOVA**

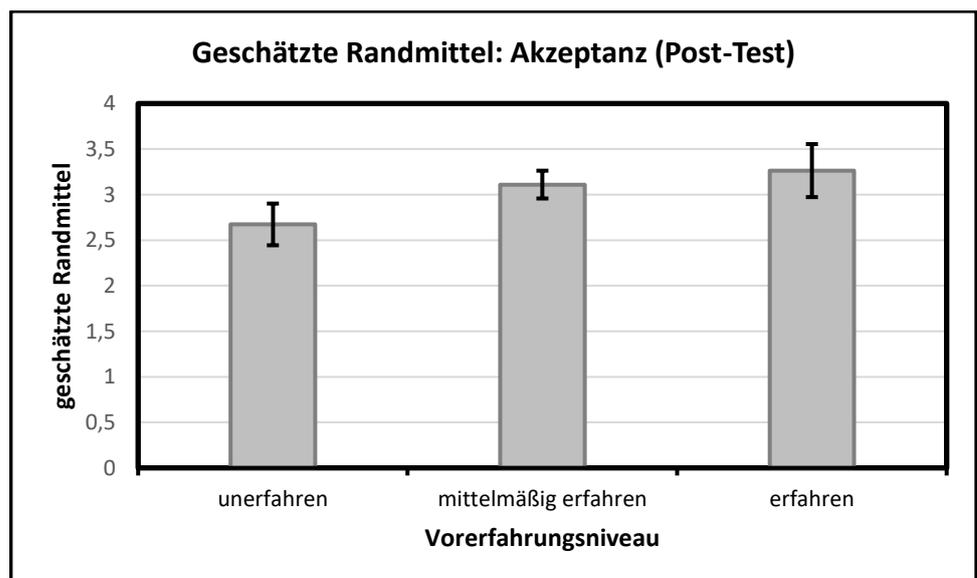
Die Voraussetzungen für die Berechnung einer ANCOVA waren nicht alle gegeben. So fiel beispielsweise der Levene-Test zur Prüfung der Varianzhomogenität signifikant aus ( $F(2, 162)=6.005, p=.003$ ). Die ANCOVA gilt zwar als robust gegenüber Verletzungen der Varianzhomogenität, dennoch wurde eine korrigierende Welch-Anpassung durchgeführt.

Die Kovariate (Akzeptanz vor der Fortbildung) zeigt einen signifikanten Zusammenhang mit der Akzeptanz nach der Fortbildung ( $F(1, 161)=10.714, p < .001, \text{part. } \eta^2 = .170$ ). Wird die Akzeptanz von Multimedia vor der Intervention der Teilnehmerinnen und Teilnehmer kontrolliert, so zeigt sich ein signifikanter Effekt der Vorerfahrungsgruppen auf die Akzeptanz nach der Fortbildung ( $F(2, 161)= 4.455, p = .013, \text{part. } \eta^2 = .052$ ). In Abbildung 6 sind die geschätzten Randmittel mit den dazugehörigen 95%-Konfidenzintervallen der Akzeptanz nach der Fortbildung für die drei Subgruppen unter Kontrolle der Akzeptanz von Multimedia vor der Intervention abgetragen.

**Tabelle 23: Ergebnisse der Akzeptanzentwicklung mittels ANCOVA**

Vorerfahrungsgruppe	Mittelwert	CI oben	CI unten
unerfahren	2,673	2,902	2,444
mittelmäßig erfahren	3,110	3,262	2,957
erfahren	3,264	3,555	2,973

(nichtstandardisierte Kovariate: Akzeptanz im Prä-Test 3,0256)



**Abbildung 57: Ergebnisse der ANCOVA zur Bestimmung von Unterschieden in der Akzeptanz nach der Fortbildung**

Für die Bestimmung geplanter Kontraste wurde als Referenzkategorie die Subgruppe 3, also vorab erfahrene Teilnehmerinnen und Teilnehmer, festgelegt.

Die geplanten Kontraste lassen erkennen, dass die Zugehörigkeit der Teilnehmenden zur Gruppe mit der mittelmäßig ausgeprägten Vorerfahrung die Akzeptanz nach der Fortbildung im Vergleich zur Gruppe mit den erfahrenen Teilnehmenden signifikant um eine mittlere Differenz von .437 Skalenpunkten erhöht ( $p=.003$ , 95% CI = [.146, .728]). Außerdem unterscheidet sich auch die Gruppe der vorab unerfahrenen Teilnehmenden signifikant von der Gruppe der vorab erfahrenen Teilnehmenden hinsichtlich der Akzeptanz nach der Fortbildung ( $p=.014$ , 95% CI = [.119, 1.063]). Die Werte der Konfidenzintervalle stützen die Signifikanzwerte, sodass von signifikanten Unterschieden zwischen den Gruppen ausgegangen werden kann.

Zusammengenommen bestätigen die Ergebnisse der ANCOVA die Hypothese 15: Es gibt signifikante Unterschiede in der Akzeptanz nach der Fortbildung zwischen den Vorerfahrungsgruppen unter Kontrolle der Akzeptanz von Multimedia vor der Intervention.

**Tabelle 24: Ergebnisse der ANCOVA**

	QS (Typ III)	df	F	p	part. $\eta^2$
<b>Korrigiertes Modell</b>	99.957	3	102.736	.000	.657
<b>Konst. Term</b>	6.312	1	19.463	.000	.108
<b>Kovariate: Akzeptanz vor der Fortbildung</b>	10.714	1	10.714	.000	.170
<b>Cluster (Vorerfahrungsgruppen)</b>	2.890	2	4.455	.013	.052
<b>Fehler</b>	52.215	161			
<b>Gesamt</b>	1616.127	165			
<b>Korrigierte Gesamtvarianz</b>	152.172	164			

Abhängige Variable: Akzeptanz nach der Fortbildung, korrigiertes  $R^2=.650$

### 6.3.5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse – Teilstudie 2

Das Ziel dieser Untersuchung bestand darin, herauszufinden, ob es gelingt, durch eine Fortbildung das TPACK zu zeigen und damit eine Änderung der Akzeptanz von Lehrkräften gegenüber Multimediaanwendungen im Physikunterricht herbeizuführen. Hierzu wurde eine Fortbildung an 21 Schulen mit insgesamt 174 Lehrkräften durchgeführt und jeweils zu zwei Zeitpunkten (Prä und Post) erfolgte

eine Erhebung mit identischen Fragebögen. Zwischen den Befragungen fand die oben näher beschriebene Fortbildung statt.

Die Erwartung, dass das TPACK durch die Teilnahme an der Fortbildung gesteigert wird, kann durch die vorliegenden Ergebnisse bestätigt werden (FF 3).

Die Annahme, dass durch die Fortbildung auch das Akzeptanzverhalten der Teilnehmerinnen und Teilnehmer gesteigert wird (FF 4A), kann nicht in allen Fällen bestätigt werden. Stattdessen zeigt sich, dass die vorgestellte Fortbildung zu Multimedia im Physikunterricht die Akzeptanz einer Lehrkraft gegenüber Multimediaanwendungen in Abhängigkeit von den Vorerfahrungen und unter Kontrolle der Vor-Akzeptanz von Multimedia vor der Fortbildung beeinflusst (FF 4B). Demnach bestehen nach der Fortbildung signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen mit unterschiedlichen Vorerfahrungen.

Die Beobachtung, dass bei den Gruppen mit einem hohen bzw. mittleren anfänglichen Akzeptanzverhalten das Akzeptanzverhalten nach der Fortbildung gefallen ist bzw. unverändert blieb, lässt sich mit Hilfe des UTAUT-Modells begründen. Durch das gesteigerte TPACK wurde das Bewusstsein für die technischen und pädagogischen Schwierigkeiten beim Einsatz von Multimedia geschärft, denn dies entspricht im UTAUT-Modell der ‚wahrgenommenen Bedienbarkeit‘. Diese wirkt sich nun entsprechend negativ auf den ‚wahrgenommenen persönlichen Nutzen‘ und die ‚persönliche Relevanzeinschätzung‘ und damit auf den ‚erwarteten Nutzen für Schülerinnen und Schüler‘ aus. Insgesamt führt dies zu der beobachteten Seitwärtsbewegung des Akzeptanzverhaltens.

Damit kann, in Übereinstimmung mit Teilstudie 1, davon ausgegangen werden, dass durch eine für das TPACK förderliche Fortbildung auch eine Veränderung in der Akzeptanz von Multimediaanwendungen im Physikunterricht erreicht wird.

Aus den vorliegenden Ergebnissen und der zugrunde liegenden Struktur der Fortbildungsveranstaltung lassen sich zudem Empfehlungen für die Strukturierung von Fortbildungen ableiten, die eine Akzeptanzsteigerung von Multimediaanwendungen im Physikunterricht als Ziel haben. An erster Stelle sei hier die Berücksichtigung verschiedener Erfahrungsgruppen genannt, für die in Fortbildungen erfahrungsgerechte Angebote unterbreitet werden könnten.

### **6.3.6 Grenzen**

Bei der Auswertung der Daten wird stark auf die Bestimmung von Unterschieden im TPACK und in der Akzeptanz gegenüber Multimedienanwendungen vor und nach einer Fortbildung fokussiert. Beide Größen wurden über die Selbsteinschätzung der Teilnehmenden erfasst. Dies ist zwar ein gängiges Vorgehen, es wird aber

offen gelassen, welche Kompetenzen konkret entwickelt sind bzw. sich gesteigert haben. Daher können im Rahmen dieser Arbeit keine Aussagen über bestimmte Fähigkeiten und Fertigkeiten hinsichtlich Multimedia im Physikunterricht getroffen werden.

Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass die Stichprobe nicht repräsentativ ist und daher nicht verallgemeinert werden kann. Es handelt sich um einzelne Physiklehrkräfte, die an bayerischen Gymnasien unterrichten. Aussagen, die sich auf die Gesamtheit aller Physiklehrkräfte oder Lehrkräfte im Allgemeinen beziehen, können daher nicht ohne Weiteres getroffen werden.

Eine Kontrollgruppe wäre auf Grund des Studiendesigns angezeigt gewesen. Allerdings ist es nicht praktikabel und wenig aufschlussreich, eine Gruppe von Lehrkräften nicht an der Intervention teilhaben zu lassen und ausschließlich die Fragebögen von Vor- und Nachtests in einem Abstand von drei Stunden bearbeiten zu lassen. Selbst die Einschränkung der Teilnahme auf den Vortrag wäre nicht im Sinne der angebotenen Lehrerfortbildung gewesen, sodass insgesamt bewusst auf eine Kontrollgruppe verzichtet wurde.

Darüber hinaus hinterlässt die vorliegende Studie auch einige offene Fragestellungen, die nicht beantwortet werden konnten, oder Fragen, die erst aus den vorliegenden Ergebnissen resultieren. Beispielsweise sollte in einer Folgestudie detailliert untersucht werden, weshalb sich die Akzeptanz von Multimediaanwendungen in den einzelnen Vorerfahrungsgruppen durch die Fortbildung unterschiedlich entwickelt hat. Hieraus können dann Folgerungen abgeleitet werden, wie eine Fortbildung oder eine Fortbildungsreihe konzipiert sein sollte, damit die Akzeptanz in allen Vorerfahrungsgruppen gesteigert werden kann. Hierfür können beispielsweise auch Hindernisse und Gelingensbedingungen abgefragt werden, die Teilnehmerinnen und Teilnehmer von derartigen Fortbildungsangeboten sehen, und es kann evaluiert werden, ob diese durch die jeweilige Fortbildung angemessen adressiert werden.

Zudem war es nicht Teil der vorliegenden Studie, herauszufinden, welche grundlegenden Einstellungen die Teilnehmer gegenüber Multimediaanwendungen im Unterricht besitzen. Es erscheint jedoch nachvollziehbar, dass die Einstellung gegenüber Multimediaanwendungen einen Einfluss auf die Akzeptanz ebendieser hat.

## **7. AUSBLICK**

---

Die vorliegende Studie zeigt, dass das TPACK allein nicht ausreicht, um den Einfluss auf die Akzeptanz von Multimediaanwendungen zu beschreiben, sondern dass auch der Faktor ‚Selbstwahrnehmung‘ mitberücksichtigt werden muss. Dieser Faktor sollte daher in einer weiteren Studie dem Modell zur Beschreibung der Technologieakzeptanz hinzugefügt werden. Gelingt es, die Einflüsse auf die Akzeptanz von Multimediaanwendungen im Physikunterricht hinreichend gut aufzuklären, so lassen sich damit effizientere Fortbildungsveranstaltungen entwickeln, durch die der Einsatz von digitalen Medien im Unterricht zielgerichteter und lernförderlicher realisiert werden kann.

Daneben wurde anhand zahlreicher Kommentare offensichtlich, dass sich Lehrkräfte Plattformen wie PUMA@LMU wünschen, um bei der Vielzahl der Möglichkeiten, die das Internet bietet, einen Überblick zu behalten. So heißt es beispielsweise in einem exemplarischen Kommentar: *„Die übersichtliche und einfach zu bedienende Sammlung von Inhalten aus unterschiedlichsten Quellen erleichtert meine Arbeit erheblich. Bitte entwickeln Sie dieses Angebot weiter und ergänzen Sie es um weitere Bausteine und fachliche Inhalte.“* Ein anderer Kommentar lautet: *„Ich würde mir noch mehr Simulationen (von Ihnen oder aus anderen Quellen) wünschen, damit PUMA noch flexibler eingesetzt werden kann.“* Die Lehrkräfte wünschen sich demnach eine flexibel einsetzbare Plattform, die zahlreiche Funktionen umfasst und trotzdem einfach zu bedienen ist. Viele sehen jedoch in den häufig zusätzlich zu erstellenden digitalen Angeboten eine erhebliche zeitliche Mehrbelastung. Mehrere Lehrkräfte beziehen sich hierbei insbesondere auf die Möglichkeit der Individualisierung der Fördermöglichkeiten, die PUMA@LMU bietet. Daher sollte für zukünftige Entwicklungen auch der Einfluss von künstlicher Intelligenz auf den Ablauf vorkonfigurierter Inhalte nicht vernachlässigt werden. So könnten beispielsweise typische Fehler oder Schülervorstellungen automatisch erkannt und schließlich mit gezielten und individuellen Aufgaben reduziert werden. Eine Lehrkraft könnte damit auch zusätzliche Informationen erhalten, mit denen sie den Unterricht in einer Klasse besser auf die Bedürfnisse zuschneiden könnte, um so Schülervorstellungen entgegenzuwirken. Zudem ergibt sich dadurch eine zeitliche Entlastung, die es Lehrkräften ermöglicht, sich auf das Wesentliche, nämlich die zielgerichtete Vermittlung von Wissen, zu konzentrieren. Hierzu ist jedoch noch eine weitergehende und intensiviertere Forschung im Bereich der künstlichen Intelligenz im Bildungsbereich nötig. Ein Projekt, das sich damit beschäftigt, ist ‚Hypermind‘, das vom Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Kaiserslautern entwickelt wird. Hypermind ist ein intelligentes Schulbuch für Tablets und Desktop-Rechner, das die Blickrichtung der Leser erkennen und analysieren können soll, um daraus eine

individuelle Förderung des Lernenden und somit einen effizienteren Lernprozess zu ermöglichen.

## 8. LITERATURVERZEICHNIS

- Ainsworth, S. (1999). The functions of multiple representations. *Computers & Education*, 33(2-3), 131–152. [https://doi.org/10.1016/S0360-1315\(99\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1315(99)00029-9)
- Ainsworth, S. (2014). The Multiple Representation Principle in Multimedia Learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. Cambridge University Press.
- Ainsworth, S. & VanLabeke, N. (2004). Multiple forms of dynamic representation. *Learning and Instruction*, 14(3), 241–255. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2004.06.002>
- Ajzen, I [I.] (2001). Nature and operation of attitudes. *Annual review of psychology*, 52, 27–58. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.52.1.27>
- Ajzen, I [Icek]. (1985). From intentions to actions: A theory of planned behavior. In J. Kuhl & J. Beckmann (Hrsg.), *Springer series in social psychology. Action control: From cognition to behavior* (1. Aufl., S. 11–39). Springer.
- Alavi, M. & Henderson, J. C. (1981). An evolutionary strategy for implementing a decision support system. *Management Science*, 27(11), 1309–1323.
- An, Y.-J. & Reigeluth, C. (2012). Creating Technology-Enhanced, Learner-Centered Classrooms: K–12 Teachers' Beliefs, Perceptions, Barriers, and Support Need Creating Technology-Enhanced, Learner-Centered Classrooms: K–12 Teachers' Beliefs, Perceptions, Barriers, and Support Needs. *Journal of Digital Learning in Teacher Education*, 28(2), 54–62.
- Angeli, C. & Valanides, N. (2009). Epistemological and methodological issues for the conceptualization, development, and assessment of ICT–TPCK: Advances in technological pedagogical content knowledge (TPCK). *Computers & Education*, 52(1), 154–168. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2008.07.006>
- Anstadt, U. (1994). *Determinanten der individuellen Akzeptanz bei Einführung neuer Technologien: Eine empirische arbeitswissenschaftliche Studie am Beispiel von CNC-Werkzeugmaschinen und Industrierobotern*. P. Lang - Internationaler Verlag der Wissenschaften.
- Archambault, L. & Crippen, K. (2009). Examining TPACK Among K-12 Online Distance Educators in the United States. *Technology and Teacher Education*, 9(1), 71–88.
- Archambault, L. M. & Barnett, J. H. (2010). Revisiting technological pedagogical content knowledge: Exploring the TPACK framework. *Computers & Education*, 55(4), 1656–1662. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.07.009>
- Artigue, M. (2002). Learning Mathematics in a CAS Environment: The Genesis of a Reflection about Instrumentation and the Dialectics between Technical and Conceptual Work. *International Journal of Computers for Mathematical Learning*, 7(3), 245–274.
- Babusiaux, C., van Leeuwen, F., Barstow, M. A., Jordi, C., Vallenari, A., Bossini, D., Bressan, A., Cantat-Gaudin, T., van Leeuwen, M., Brown, A. G. A., Prusti, T., Bruijne, J. H. J. de, Bailer-Jones, C. A. L., Biermann, M., Evans, D. W., Eyer, L., Jansen, F., Klioner, S. A., Lammers, U., . . . Zwitter, a. T. (2018). Gaia Data Release 2. *Astronomy & Astrophysics*, 616, A10. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832843>

- Bacher, J. (2001). Teststatistiken zur Bestimmung der Clusterzahl für Quick Cluster. *ZA-Information / Zentralarchiv für Empirische Sozialforschung*, 48, 71–97.
- Baddeley, A. (1983). Working Memory. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 302(1110), 311–324.
- Baddeley, A. D. (1997). *Human memory: Theory and practice*. Psychology Press.
- Bagozzi, R. P. (2007). The legacy of the technology acceptance model and a proposal for a paradigm shift. *Journal of the association for information systems*, 8(4), 3.
- Baron, R. M. & Kenny, D. A. (1986). The Moderator-Mediator Variable Distinction in Social Psychological Research: Conceptual, Strategic, and Statistical Considerations. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 51(6), 1173–1182.
- Behrens, P. & Rathgeb, T. (2017). JIM Studie. *Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (mpfs)*.
- Bentler, P. M. & Speckart, G. (1979). Models of attitude-behavior relations. *Psychological review*, 86(5), 452.
- Bhattacharjee, A. & Premkumar, G. (2004). Understanding Changes in Belief and Attitude toward Information Technology Usage: A Theoretical Model and Longitudinal Test. *MIS Quarterly*, 28(2), 229–254. <http://www.jstor.org/stable/25148634>
- Bibi, S. & Khan, S. H. (2015). TPACK in action: A study of a teacher educator's thoughts when planning to use ICT. *Australasian Journal of Educational Technology*. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.14742/ajet.3071>
- Bierhoff, H.-W. (2006). *Sozialpsychologie: Ein Lehrbuch* (6., überarb. und erw. Aufl.). Kohlhammer.
- Blondin, S [S.], Matheson, T [T.], Kirshner, R. P [R. P.], Mandel, K. S [K. S.], Berlind, P [P.], Calkins, M., Challis, P., Garnavich, P. M [P. M.], Jha, S. W [S. W.], Modjaz, M [M.], Riess, A. G [A. G.] & Schmidt, B. P. (2012). The spectroscopic diversity of type Ia supernovae. *The Astronomical Journal*, 143(5), 126. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/143/5/126>
- Blondin, S [Stéphane], Dessart, L., Hillier, D. J. & Khokhlov, A. M. (2017). *Evidence for sub-Chandrasekhar-mass progenitors of Type Ia supernovae at the faint end of the width-luminosity relation* (Nr. 1). Oxford University Press. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 470.
- Bloom, J. S., Kasen, D [Daniel], Shen, K. J., Nugent, P. E., Butler, N. R., Graham, M. L [Melissa L.], Andrew Howell, D., Kolb, U., Holmes, S., Haswell, C. A., Burwitz, V., Rodriguez, J. & Sullivan, M [Mark] (2012). A compact degenerate primary-star progenitor of SN 2011fe. *The Astrophysical Journal*, 744(2), L17. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/744/2/L17>
- Borko, H. Professional Development and Teacher Learning: Mapping the Terrain.
- Bortz, J. & Weber, R [René] (2005). Deskriptive Statistik. *Statistik: für Human-und Sozialwissenschaftler*, 15–47.
- Boucheix, J.-M. & Guignard, H. (2005). What animated illustrations conditions can improve technical document comprehension in young students? Format, signaling and control of the presentation. *European Journal of Psychology of Education*, 20(4), 369–388. <https://doi.org/10.1007/BF03173563>
- Bouwhuis, D. G., Meesters, L. & Sponselee, A. (2012). Models for the acceptance of tele-care solutions: Intention vs behaviour. *Gerontechnology*, 11(1). <https://doi.org/10.4017/gt.2012.11.01.007.00>

- Branch, D [David], Baron, E., Thomas, R. C [R. C.], Kasen, D [D.], Li, W [Weidong] & Filippenko, A. V [Alexei V.] (2004). Reading the Spectra of the Most Peculiar Type Ia Supernova 2002cx. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 116(824), 903–908.  
<https://doi.org/10.1086/425081>
- Branch, D [David], Benetti, S [S.], Kasen, D [Daniel], Baron, E., Jeffery, D. J [David J.], Hatano, K., Stathakis, R. A., Filippenko, A. V [Alexei V.], Matheson, T [Thomas], Pastorello, A [A.] & others (2002). Direct analysis of spectra of type Ib supernovae. *The Astrophysical Journal*, 566(2), 1005ff.
- Branch, D [David], Jeffery, D. J [D. J.], Young, T. R. & Baron, E. (2006). Hydrogen in type Ic supernovae? *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 118(844), 791ff.
- Branch, D [David] & Wheeler, J. C. (2017). *Supernova explosions* (Bd. 4). Springer.
- Bresges, A. (2018). Mobile Learning in der Schule. In C. de Witt & C. Gloerfeld (Hrsg.), *Handbuch Mobile Learning* (S. 613–635). Springer.
- Bresges, A., Schmoock, J., Quast, A., Schunke-Galley, J., Weber, J., Firmenich, D., Beckmann, R. & Kreiten, M. (2013). Das Reichshofer Experimentierdesign“ zur Entwicklung und Überprüfung des Einsatzes von Tablet-PC im Physikunterricht. In *PhyDid B - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in Jena*. <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/467>
- Browne, M. W., Cudeck, R. & others (1993). Alternative ways of assessing model fit. *Sage focus editions*, 154, 136.
- Buchler, J. R. (1997). Classical Cepheids--a Review. *arXiv*. arXiv preprint astro-ph/9707121
- Buchler, J. R. (2009). The State of Cepheid Pulsation Theory, 51–58. <https://doi.org/10.1063/1.3246556>
- Bühner, M. (2010). *Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion* (3. Aufl.). Always learning. Pearson.
- Bühner, M. (2011). *Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion* (3. Aufl.). PS Psychologie. Pearson Studium. <http://lib.myilibrary.com/detail.asp?id=404890>
- Bürg, O., Kronburger, K. & Mandl, H. (2004). *Implementation von E-Learning in Unternehmen: Akzeptanzsicherung als zentrale Herausforderung* [Forschungsbericht]. Ludwig-Maximilians-Universität München, München. [https://epub.ub.uni-muenchen.de/444/1/FB\\_170.pdf](https://epub.ub.uni-muenchen.de/444/1/FB_170.pdf)
- Butcher, K. R. (2006). Learning from text with diagrams: Promoting mental model development and inference generation. *Journal of Educational Psychology*, 98(1), 182–197.  
<https://doi.org/10.1037/0022-0663.98.1.182>
- Butcher, K. R. (2014). The Multimedia Principle. In R. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 174–205). Cambridge University Press.
- Buzzard, C., Crittenden, V. L., Crittenden, W. F. & McCarty, P. (2011). The Use of Digital Technologies in the Classroom. *Journal of Marketing Education*, 33(2), 131–139.  
<https://doi.org/10.1177/0273475311410845>
- Castaño-Muñoz, J., Duart, J. M. & Sancho-Vinuesa, T. (2014). The Internet in face-to-face higher education: Can interactive learning improve academic achievement? *British Journal of Educational Technology*, 45(1), 149–159. <https://doi.org/10.1111/bjet.12007>

- Chai, C. S [Ching Shing], Ng, E. M. W., Li, W [Wenhao], Hong, H.-Y. & Koh, J. H. L [Joyce H. L.] (2013). Validating and modelling technological pedagogical content knowledge framework among Asian preservice teachers. *Australasian Journal of Educational Technology*, 29(1).  
<https://doi.org/10.14742/ajet.174>
- Chai, C. S [Ching Sing], Koh, J. H. L [Joyce H. L.] & Tsai, C.-C. (2013). A Review of Technological Pedagogical Content Knowledge. *Educational Technology & Society*, 16(2), 31–51.  
[http://www.ifets.info/journals/16\\_2/4.pdf](http://www.ifets.info/journals/16_2/4.pdf)
- Chandler, P. & Sweller, J. (1991). Cognitive Load Theory and the Format of Instruction. *Cognition and Instruction*, 8(4), 293–332. [https://doi.org/10.1207/s1532690xci0804\\_2](https://doi.org/10.1207/s1532690xci0804_2)
- Chen, K. & Chan, A. H. S. (2011). A review of technology acceptance by older adults. *Gerontechnology*, 10(1), 1–12.
- Childress, M. J., Scalzo, R. A., Sim, S. A [S. A.], Tucker, B. E., Yuan, F., Schmidt, B. P., Cenko, S. B [S. B.], Silverman, J. M [J. M.], Contreras, C [C.], Hsiao, E. Y., Phillips, M., Morrell, N., Jha, S. W [S. W.], McCully, C [C.], Filippenko, A. V [A. V.], Anderson, J. P., Benetti, S [S.], Bufano, F., Jaeger, T. de, . . . Zhou, G. (2013). Spectroscopic observations of sn 2012fr: A luminous, normal type ia supernova with early high-velocity features and a late velocity plateau. *The Astrophysical Journal*, 770(1), 29. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/770/1/29>
- Christy, R. F. (1968). The theory of Cepheid variability. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 9(1), 13–39.
- Churazov, E., Sunyaev, R., Isern, J., Knödseder, J., Jean, P., Lebrun, F., Chugai, N., Grebenev, S., Bravo, E., Sazonov, S. & Renaud, M. (2014). Cobalt-56  $\gamma$ -ray emission lines from the type Ia supernova 2014J. *Nature*, 512(7515), 406–408. <https://doi.org/10.1038/nature13672>
- Clark, J. M. & Paivio, A. (1991). Dual coding theory and education. *Educational Psychology Review*, 3(3), 149–210.
- Clark, R. E. (1983). Reconsidering Research on Learning from Media. *Educational Researcher*, 53(4), 445–459.
- Clark, R. E. (1994). Media Will Never Influence Learning. *Educational Technology Research and Development*, 42(2), 21–29.
- Claro, M., Salinas, A., Cabello-Hutt, T., San Martín, E., Preiss, D. D., Valenzuela, S. & Jara, I. (2018). Teaching in a Digital Environment (TIDE): Defining and measuring teachers' capacity to develop students' digital information and communication skills. *Computers & Education*, 121, 162–174.  
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.03.001>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. ed.). Erlbaum.  
<http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0731/88012110-d.html>
- Colgate, S. A. & McKee, C. (1969). Early supernova luminosity: ". " 157 (1969): 623. *The Astrophysical Journal*, 157, 623ff.
- Comi, S. L., Argentin, G., Gui, M., Origo, F. & Pagani, L. (2017). Is it the way they use it? Teachers, ICT and student achievement. *Economics of Education Review*, 56, 24–39.  
<https://doi.org/10.1016/j.econedurev.2016.11.007>

- Contreras, C [Carlos], Hamuy, M [Mario], Phillips, M. M., Folatelli, G., Suntzeff, N. B., Persson, S. E., Stritzinger, M., Boldt, L., González, S., Krzeminski, W., Morrell, N [Nidia], Roth, M., Salgado, F., Maureira, M. J., Burns, C. R., Freedman, W. L., Madore, B. F., Murphy, D., Wyatt, P., . . . Filippenko, A. V [Alexei V.] (2010). The Carnegie Supernova Project: first photometry data release of low-redshift type Ia supernovae. *The Astronomical Journal*, *139*(2), 519–539. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/139/2/519>
- Cox, S. (2008). *A Conceptual Analysis of Technological Pedagogical Content Knowledge* [Dissertation]. Brigham Young University. <http://scholarsarchive.byu.edu/etd/1482>
- Cox, S. & Graham, C. R. (2009). Diagramming TPACK in Practice: Using an Elaborate Diagramming TPACK in Practice: Using an Elaborated Model of the TPACK Framework Using an Elaborated Mod of the TPACK Framework to Analyze and Depict of the TPACK Framework to Analyze and Depict Teacher Knowledge to Analyze and Depi Teacher Knowledge, *53*(5), 60–69.
- Crompton, H., Burke, D. & Gregory, K. H. (2017). The use of mobile learning in PK-12 education: A systematic review. *Computers & Education*, *110*, 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2017.03.013>
- Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, *16*(3), 297–334.
- Dave, P., Kashyap, R., Fisher, R., Timmes, F., Townsley, D. & Byrohl, C. (2017). Constraining the Single-degenerate Channel of Type Ia Supernovae with Stable Iron-group Elements in SNR 3C 397. *The Astrophysical Journal*, *841*(1), 58. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7134>
- Davis, F., Bagozzi, R. & Warshaw, P. (1992). Extrinsic and Intrinsic Motivation to Use Computers in the Workplace1. *Journal of Applied Social Psychology*, *22*(14), 1111–1132. <https://doi.org/10.1111/j.1559-1816.1992.tb00945.x>
- Davis, F. D. (1986). *Technology Acceptance Model for Empirically Testing New End-User Information Systems: Theory and Results* [Dissertation]. Massachusetts Institute of Technology; Sloan School of.
- Davis, F. D. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, *13*, 319–339.
- Davis, F. D., Bagozzi, R. P. & Warshaw, P. R. (1989). User acceptance of computer technology: A comparison of two theoretical models. *Management Science*, *35*(8), 982–1003.
- Degenhardt, W. (1986). *Akzeptanzforschung zu Bildschirmtexten: Methoden und Ergebnisse*. Reihard Fischer.
- Derkse, W. (1981). Popper's epistemology as a pedagogic and didactic principle, or: Let them make more" mistakes. *Journal of Chemical Education*, *58*(7), 565.
- Desimone, L. M. (2011). A Primer on Effective Professional Development. *Phi Delta Kappan*, *92*(6), 68–71.
- DiMauro, T. (2005). Transforming Physics Education. *Physics today*, *58*(11).
- Dirkes, M. (1982). Akzeptanz und Akzeptabilität der Informationstechnologie. *TU Berlin (Hg.), Wissenschaftsmagazin*, 12–15.

- DLR. (2010). *Sonnensystem*.  
[https://www.dlr.de/next/Portaldata/69/Resources/images/2\\_raumfahrt/antworten/10\\_18\\_sonnensystem/Grafik\\_1-Sonnensystem\\_590x330.jpg](https://www.dlr.de/next/Portaldata/69/Resources/images/2_raumfahrt/antworten/10_18_sonnensystem/Grafik_1-Sonnensystem_590x330.jpg)\* [ zuletzt geprüft: 22.02.2023].
- Earle, R. S. (2002). The Integration of Instructional Technology into Public Education: Promises and Challenges. *Educational Technology*, 42(1), 5–13.  
<http://www.speakeasydesigns.com/SDSU/student/640/misc%20articles/earle.pdf>
- Eitel, A., Dersch, A.-S. & Renkl, A. (2019). Wissenschaftliche Annahmen und Fehlkonzepte angehender Lehrkräfte über das Lernen mit Multimedia. *Unterrichtswissenschaft*, 47(4), 451–474.  
<https://doi.org/10.1007/s42010-019-00049-4>
- Eitner, P., Bergemann, M [M.], Hansen, C. J., Cescutti, G., Seitenzahl, I. R [I. R.], Larsen, S. & Plez, B. (2020). Observational constraints on the origin of the elements. *Astronomy & Astrophysics*, 635, A38. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936603>
- El-Gayar, O., Moran, M. & Hawkes, M. (2011). Students' Acceptance of Tablet PCs and Implications for Educational Institutions. *Journal of Educational Technology & Society*, 14(2), 58–70.
- Elias, J. H. & Frogel, J. A. (1981). Infrared light curves of Type I supernovae. *The Astrophysical Journal*, 251, L13-L16.
- Elias, J. H., Matthews, K., Neugebauer, G. & Persson, S. E. (1985). Type I supernovae in the infrared and their use as distance indicators. *The Astrophysical Journal*, 296(2), 379–389.
- Englund, C., Olofsson, A. D. & Price, L. (2016). Teaching with technology in higher education: Understanding conceptual change and development in practice. *Higher Education Research & Development*, 36(1), 73–87. <https://doi.org/10.1080/07294360.2016.1171300>
- FELDMAN, T. (1994). *Multimedia* (1. Aufl.). *BNBRF report: Bd. 64*. Blueprint.
- Filippenko, A. V [Alexei V.] (1997). Optical spectra of supernovae. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 35(1), 309–355.
- Fink, M [Michael], Hillebrandt, W [W.] & Röpke, F. K [F. K.] (2007). Double-detonation supernovae of sub-Chandrasekhar mass white dwarfs. *Astronomy & Astrophysics*, 476(3), 1133–1143.
- Fink, M [Michael], Röpke, F. K [F. K.], Hillebrandt, W [W.], Seitenzahl, I. R [I. R.], Sim, S. A [S. A.] & Kromer, M [M.] (2010). Double-detonation sub-Chandrasekhar supernovae: can minimum helium shell masses detonate the core? *Astronomy & Astrophysics*, 514, A53.
- Fischer, L. & Wiswede, G. (2009). *Grundlagen der Sozialpsychologie* (3. Aufl.). *Wolfs Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften*. Oldenbourg.
- Fishbein, M. & Ajzen, I [Icek]. (1975). *Belief, Attitude, Intention, and Behaviour: An Introduction to Theory and Research*. *Addison-Wesley Series In Social Psychology*. Addison-Wesley.  
<https://people.umass.edu/aizen/f&a1975.html>
- Foley, R. J., Challis, P. J., Chornock, R [R.], Ganeshalingam, M [M.], Li, W [W.], Marion, G. H., Morrell, N. I., Pignata, G., Stritzinger, M. D., Silverman, J. M [J. M.], Wang, X [X.], Anderson, J. P., Filippenko, A. V [A. V.], Freedman, W. L., Hamuy, M [M.], Jha, S. W [S. W.], Kirshner, R. P [R. P.], McCully, C [C.], Persson, S. E., . . . Soderberg, A. M. (2013). TYPE Iax SUPERNOVAE: A NEW CLASS OF STELLAR EXPLOSION. *The Astrophysical Journal*, 767(1), 57. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/767/1/57>

- Freedman, W. L. & Madore, B. F. (1990). An empirical test for the metallicity sensitivity of the Cepheid period-luminosity relation. *The Astrophysical Journal*, *365*, 186–194.
- Frey, D [D.], Stahlberg, D. & Gollwitzer, P. M. (1993). Einstellung und Verhalten. Die Theorie des überlegten Verhaltens und die Theorie des geplanten Verhaltens. *Kognitive Theorien der Sozialpsychologie*, *1*.
- Fullan, M. (2016). The elusive nature of whole system improvement in education. *Journal of Educational Change*, *17*(4), 539–544. <https://doi.org/10.1007/s10833-016-9289-1>
- Gaia Collaboration, Babusiaux, C., van Leeuwen, F., Barstow, M. A., Jordi, C., Vallenari, A., Bossini, D., Bressan, A., Cantat-Gaudin, T., van Leeuwen, M., Brown, A. G. A., Prusti, T., Bruijine, J. H. J. de, Bailer-Jones, C. A. L., Biermann, M., Evans, D. W., Eyer, L., Jansen, F., Klioner, S. A., . . . Zwitter, T. (2018). Gaia Data Release 2: Observational Hertzsprung-Russell diagrams. *Astronomy & Astrophysics*, *616*, A10. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832843>
- George, D. & Mallery, P. (2003). *SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference, 11.0 update* (4th ed.). A & B.
- Gerick, J., Schaumburg, H., Kahnert, J. & Eickelmann, B. (2014). Lehr- und Lernbedingungen des Erwerbs computer und informationsbezogener Kompetenzen in den ICILS-2013-Teilnehmerländern. In K. Schwippert, B. Eickelmann, W. Bos, F. Goldhammer, H. Schaumburg & J. Gerick (Hrsg.), *ICILS 2013: Computer- und informationsbezogene Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern in der 8. Jahrgangsstufe im internationalen Vergleich* (S. 147–196). Waxmann Verlag.
- Gibbons, F. X., Gerrard, M., Blanton, H. & Russell, D. W. (1998). Reasoned action and social reaction: Willingness and intention as independent predictors of health risk. *Journal of Personality and Social Psychology*, *74*(5), 1164–1180. <https://doi.org/10.1037//0022-3514.74.5.1164>
- Gieren, W. P., Barnes III, T. G. & Moffett, T. J. (1993). The Cepheid period-luminosity relation from independent distances of 100 galactic variables. *The Astrophysical Journal*, *418*, 135.
- Gignac, G. E. & Szodorai, E. T. (2016). Effect size guidelines for individual differences researchers. *Personality and Individual Differences*, *102*, 74–78. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2016.06.069>
- Girwidz, R. (2015). Multimedia unter lerntheoretischen Aspekten. In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Springer-Lehrbuch. Physikdidaktik: Theorie und Praxis* (3. Aufl., S. 843–878). Springer Spektrum.
- Girwidz, R., Thoms, L.-J., Pol, H., López, V., Michelini, M., Stefanel, A., Greczyło, T., Müller, A., Gregorcic, B. & Hömöstrei, M. (2019). Physics teaching and learning with multimedia applications: a review of teacher-oriented literature in 34 local language journals from 2006 to 2015. *International Journal of Science Education*, *41*(9), 1181–1206.
- Glaser, W. R. (1994). Menschliche Informationsverarbeitung. *Eberleh, Edmund; Oberquelle, Horst; Oppermann, Reinhard (1994): Einführung in die Software-Ergonomie. Gestaltung graphisch- interaktiver Systeme: Prinzipien, Werkzeuge, Lösungen*, *2*, 7–47.
- Glatzer, W. & Hübinger, W. (1990). Lebenslagen und Armut. *Armut im Wohlstand. Frankfurt/M.*
- Goldstone, R. L. & Son, J. Y. (2005). The Transfer of Scientific Principles Using Concrete and Idealized Simulations. *Journal of the Learning Sciences*, *14*(1), 69–110. [https://doi.org/10.1207/s15327809jls1401\\_4](https://doi.org/10.1207/s15327809jls1401_4)

- Graham, C., Cox, S. & Velasquez, A. (2009). Teaching and Measuring TPACK Development in Two Preservice Teacher Preparation Programs. In I. Gibson, R. Weber, K. McFerrin, R. Carlsen & D. A. Willis (Hrsg.), *Proceedings of Society for Information Technology & Teacher Education International Conference 2009* (S. 4081–4086). Association for the Advancement of Computing in Education (AACE). <https://www.learntechlib.org/p/31297>
- Graham, C. R. (2011). Theoretical considerations for understanding technological pedagogical content knowledge (TPACK). *Computers & Education*, 57(3), 1953–1960. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.04.010>
- Graham, C. R., Burgoyne, N., Cantrell, P., Smith, L., St. Clair, L. & Harris, R. (2009). TPACK Development in Science Teaching: Measuring the TPACK Confidence of Inservice Science Teachers Measuring the TPACK Confide of Inservice Science Teachers. *TeachTrends*, 53(5), 70–79.
- Gronow, S., Collins, C., Ohlmann, S. T., Pakmor, R [Rüdiger], Kromer, M [Markus], Seitenzahl, I. R [Ivo R.], Sim, S. A [Stuart A.] & Röpke, F. K [Friedrich K.] (2020). SNe Ia from double detonations: Impact of core-shell mixing on the carbon ignition mechanism. *Astronomy & Astrophysics*, 635, A169.
- Grossmann, P. L. & Richert, A. E. (1988). Unacknowledged knowledge growth: A re-examination of the effects of the teacher education. *Teaching and Teacher Education*, 4(1), 53–62. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0742051X88900248?via%3Dihub>
- GSR. (o.D.). *Druckwasserreaktor (DWR)*. [https://www.grs.de/de/glossar/druckwasserreaktor-dwr#:~:text=Der%20Druckwasserreaktor%20hat%20zwei%20getrennte,Reaktordruckbeh%C3%A4lter\).\\*](https://www.grs.de/de/glossar/druckwasserreaktor-dwr#:~:text=Der%20Druckwasserreaktor%20hat%20zwei%20getrennte,Reaktordruckbeh%C3%A4lter).*) [ zuletzt geprüft: 23.03.2023].
- Guillochon, J., Parrent, J., Kelley, L. Z. & Margutti, R. (2017). An Open Catalog for Supernova Data. *The Astrophysical Journal*, 835(1), 64. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/835/1/64>
- Guskey, T. R. (2002). Professional Development and Teacher Change. *Teachers and Teaching: theory and practice*, 8(3/4), 381–391.
- Gustafsson, P. (2012). YouTube as an educational tool in physics teaching. In *IOSTE XV International Symposium, Science & Technology Education for Development, Citizenship and Social Justice, La Medina-Yasmine Hammamet*.
- Gut-Glanzmann, C. (2012). *Modellierung und Messung experimenteller Kompetenz: Analyse eines large-scale Experimentiertests*. Zugl.: Basel, Univ., Diss., 2012. *Studien zum Physik- und Chemielernen: Bd. 134*. Logos-Verl.
- Gutierrez, J., Garcia-Berro, E [E.], Iben Jr, I [I.], Isern, J., Labay, J. & Canal, R. (1996). The final evolution of ONeMg electron-degenerate cores. *The Astrophysical Journal*, 459, 701ff.
- Guy, J., Sullivan, M [M.], Conley, A., Regnault, N., Astier, P., Baland, C., Basa, S., Carlberg, R. G., Fouchez, D., Hardin, D., Hook, I. M [I. M.], Howell, D. A [D. A.], Pain, R., Palanque-Delabrouille, N., Perrett, K. M., Pritchett, C. J., Rich, J., Ruhlmann-Kleider, V., Balam, D., . . . Walker, E. S [E. S.] (2010). The Supernova Legacy Survey 3-year sample: Type Ia supernovae photometric distances and cosmological constraints. *Astronomy & Astrophysics*, 523, A7. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201014468>

- Haddock, G. & Maio, G. R. (2007). Einstellungen: Inhalt, Struktur und Funktionen. In K. Jonas, W. Stroebe, M. Hewstone, C. I. Leberherz & M. Reiss (Hrsg.), *Springer-Lehrbuch. Sozialpsychologie: Eine Einführung ; mit 17 Tabellen* (5. Aufl., S. 187–223). Springer.
- Hammann, M. (2004). Kompetenzentwicklungsmodelle Merkmale und ihre Bedeutung-dargestellt anhand von Kompetenzen beim Experimentieren. *Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht*, 196–203.
- Hammann, M., Phan, T. H. & Bayrhuber, H. (2008). Experimentieren als Problemlösen: Lässt sich das SDDS-Modell nutzen, um unterschiedliche Dimensionen beim Experimentieren zu messen? In M. Prenzel, I. Gogolin & H.-H. Krüger (Hrsg.), *Kompetenzdiagnostik* (S. 33–49). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Hansen, J. M., Saridakis, G. & Benson, V. (2018). Risk, trust, and the interaction of perceived ease of use and behavioral control in predicting consumers' use of social media for transactions. *Computers in Human Behavior*, 80, 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.11.010>
- Henderson, R. & Divett, M. J. (2003). Perceived usefulness, ease of use and electronic supermarket use. *International Journal of Human-Computer Studies*, 59(3), 383–395. [https://doi.org/10.1016/S1071-5819\(03\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S1071-5819(03)00079-X)
- Hew, K. F. & Brush, T. (2007). Integrating technology into K-12 teaching and learning: Current knowledge gaps and recommendations for future research. *Educational Technology Research and Development*, 55(3), 223–252. <https://doi.org/10.1007/s11423-006-9022-5>
- Hilbig, W. (1984). Akzeptanzforschung neuer Bürotechnologien. Ergebnisse einer empirischen Fallstudie. *Office Management*, 32(4), 320–323.
- Hilfert-Rüppell, D., Penrose, V., Höner, K., Eghtessad, A., Koch, K. & Hormann, O. (2018). Forschendes Lernen zur naturwissenschaftlich-experimentellen Problemlösefähigkeit von Schülerinnen und Schülern. *Herausforderung Lehrer\_innenbildung - Zeitschrift zur Konzeption, Gestaltung und Diskussion*, 1(2), 345–365. <https://doi.org/10.4119/UNIBI/HLZ-46>
- Hillebrandt, W [Wolfgang] & Niemeyer, J. C. (2000). Type Ia Supernova Explosion Models. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 38(1), 191–230. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.38.1.191>
- Hillman, Y., Prialnik, D., Kovetz, A. & Shara, M. M. (2016). Growing white dwarfs to the Chandrasekhar limit: the parameter space of the single degenerate SN Ia channel. *The Astrophysical Journal*, 819(2), 168. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/819/2/168>
- Hirsig, R. (2001). *Statistische Methoden in den Sozialwissenschaften*. Seismo-Verlag.
- Höffler, T. N. & Leutner, D. (2007). Instructional animation versus static pictures: A meta-analysis. *Learning and Instruction*, 17(6), 722–738. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2007.09.013>
- Holden, R. J. & Karsh, B.-T. (2010). The technology acceptance model: Its past and its future in health care. *Journal of biomedical informatics*, 43(1), 159–172. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2009.07.002>
- Holmbeck, G. N. (1997). Toward Terminological, Conceptual, and Statistical Clarity in the Study of Mediators and Moderators: Examples From the Child-Clinical and Pediatric Psychology Literatures. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 65(4), 599–610.

- Horton, R. P., Buck, T., Waterson, P. E. & Clegg, C. W. (2001). Explaining intranet use with the technology acceptance model. *Journal of Information Technology*, 16(4), 237–249.  
<https://doi.org/10.1080/02683960110102407>
- Hoyle, F. & Fowler, W. A. (1960). Nucleosynthesis in supernovae. *Astrophysical Journal*(132), 565.
- Hsu, C.-L. & Lu, H.-P. (2004). Why do people play on-line games? An extended TAM with social influences and flow experience. *Information & Management*, 41(7), 853–868.  
<https://doi.org/10.1016/j.im.2003.08.014>
- Hu, L. & Bentler, P. M. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 6(1), 1–55. <https://doi.org/10.1080/10705519909540118>
- Hussein, Z. (2015). Explicating students' behaviours of E-learning: A viewpoint of the extended technology acceptance. *International Journal of Management and Applied Science*, 1(10), 68–73.
- Iben Jr, I [Icko], Nomoto, K [Ken'ichi], Tornambe, A. & Tutukov, A. V. (1987). On interacting helium star-white dwarf pairs as supernova precursors. *The Astrophysical Journal*, 317, 717–723.
- Iben Jr, I [Icko] & Tutukov, A. V. (1985). On the evolution of close binaries with components of initial mass between 3 solar masses and 12 solar masses. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 58, 661–710.
- Idcgatekiva, T. & Lindner, M. (2015). Multimedia: A suitable tool for project-based education: A survey among czech, slovakian and german biology teachers. In M. Rusek (Vorsitz), *Project-based education in science education*. Symposium im Rahmen der Tagung von Univerzita Karlova, Prag.
- Im, I., Hong, S. & Kang, M. S. (2010). An International Comparison Of Technology Adoption: Testing the UTAUT Model.
- Issa, N., Schuller, M., Santacaterina, S., Shapiro, M., Wang, E., Mayer, R. E. & DaRosa, D. A. (2011). Applying multimedia design principles enhances learning in medical education. *Medical Education*, 45, 818–826.  
[http://olms.cte.jhu.edu/olms2/data/ck/sites/225/files/Instructional%20Design\(1\).pdf](http://olms.cte.jhu.edu/olms2/data/ck/sites/225/files/Instructional%20Design(1).pdf)
- Issing, L. J. & Strzebkowski, R. (1997). Lernen mit Multimedia aus psychologisch-didaktischer Sicht. In Fachverband didaktik der Physik (Hrsg.), *Didaktik der Physik: Vorträge-Physikertagung* (S. 47–68).
- Jang, S.-J. (2008). Innovations in science teacher education: Effects of integrating technology and team-teaching strategies. *Computers & Education*, 51(2), 646–659.  
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2007.07.001>
- Jaufmann, D. (1999). Technikakzeptanzforschung. S. Bröchler, G. Simonis & K. Sundermann (Hg.), *Handbuch Technikfolgenabschätzung* (S. 205-225), Berlin: Edition Sigma.
- Jen, T.-H., Yeh, Y.-F., Hsu, Y.-S., Wu, H.-K. & Chen, K.-M. (2016). Science teachers' TPACK-Practical: Standard-setting using an evidence-based approach. *Computers & Education*, 95, 45–62.  
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.12.009>
- Jha, S., Riess, A. G [Adam G.] & Kirshner, R. P [Robert P.] (2007). Improved Distances to Type Ia Supernovae with Multicolor Light-Curve Shapes: MLCS2k2. *The Astrophysical Journal*, 659(1), 122–148. <https://doi.org/10.1086/512054>

- Jimoyiannis, A. (2010). Designing and implementing an integrated technological pedagogical science knowledge framework for science teachers professional development. *Computers & Education*, 55(3), 1259–1269. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.05.022>
- Jones, K., Christou, C., Pittalis, M. & Mousoulides, N. (2006). Theoretical perspectives on the design of dynamic visualisation software. In C. Hoyles, J.-B. Lagrange, L. H. Son & N. Sinclair (Hrsg.), *Proceedings of the Seventeenth ICMI Study Conference, Digital technologies and mathematics teaching and learning: Rethinking the terrain*.
- Jong, T. de, Ainsworth, S., Dobson, M., van der Hulst, A., Levonen, J., Reimann, P., Sime, J.-A., van Someren, M., Spada, H. & Swaak, J. (1998). Acquiring knowledge in science and mathematics: The use of multiple representations in technology based learning environments. In *Learning with multiple representations* (S. 9–40). Pergamon/Elsevier.
- Jöresko, K. G. (1970). A general method for analysis of covariance structures. *Biometrika*, 57(2), 239–251. <https://doi.org/10.1093/biomet/57.2.239>
- Jöreskog, K. G. (1967). Some contributions to maximum likelihood factor analysis. *Psychometrika*, 32(4), 443–482.
- Kalyuga, S. & Sweller, J. (2014). The Redundancy Principle in Multimedia Learning. In R. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 247–262). Cambridge University Press.
- Karahanna, E., Straub, D. W. & Chervany, N. L. (1999). Information Technology Adoption Across Time: A Cross-Sectional Comparison of Pre-Adoption and Post-Adoption Beliefs. *MIS Quarterly*, 23(2), 183. <https://doi.org/10.2307/249751>
- Kasen, D [D.], Röpke, F. K [F. K.] & Woosley, S. E. (2009). The diversity of type Ia supernovae from broken symmetries. *Nature*, 460(7257), 869–872. <https://doi.org/10.1038/nature08256>
- Kasen, D [Daniel] (2006). Secondary Maximum in the Near-Infrared Light Curves of Type Ia Supernovae. *The Astrophysical Journal*, 649(2), 939–953. <https://doi.org/10.1086/506588>
- Keengwe, J., Onchwari, G. & Wachira, P. (2008). Computer Technology Integration and Student Learning: Barriers and Promise. *Journal of Science Education and Technology*, 17(6), 560–565. <https://doi.org/10.1007/s10956-008-9123-5>
- Keller, L. & Comenius, J. A. (Hrsg.). (1998). *Das einzig Notwendige: Unum necessarium* (2., überarb.). Rozekruis Pers.
- Kember, D. (2008). Digital world, digital pedagogies: Reframing the learning landscape. In *Australian Computers in Education Conference (ACEC), Canberra, Australia*.
- Kim, S., Yoon, M., Whang, S.-M., Tversky, B. & Morrison, J. B. (2007). The effect of animation on comprehension and interest. *Journal of Computer Assisted Learning*, 23(3), 260–270.
- Kind, V. (2009). Pedagogical content knowledge in science education: Perspectives and potential for progress. *Studies in Science Education*, 45(2), 169–204. <https://doi.org/10.1080/03057260903142285>
- King, W. R. & He, J. (2006a). A meta-analysis of the technology acceptance model. *Information & Management*, 43(6), 740–755. <https://doi.org/10.1016/j.im.2006.05.003>
- King, W. R. & He, J. (2006b). A meta-analysis of the technology acceptance model. *Information & Management*, 43(6), 740–755. <https://doi.org/10.1016/j.im.2006.05.003>

- Kiray, S. A. (2016). Development of a TPACK Self-efficacy Scale for Preservice Science Teachers. *International Journal of Research in Education and Science*, 2(2), 527.  
<https://doi.org/10.21890/ijres.64750>
- Kirby, E. N., Xie, J. L., Guo, R., los Reyes, M. A. C. de, Bergemann, M [Maria], Kovalev, M., Shen, K. J., Piro, A. L. & McWilliam, A. (2019). Evidence for Sub-Chandrasekhar Type Ia Supernovae from Stellar Abundances in Dwarf Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 881(1), 45.  
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab2c02>
- Kircher, E., Girwitz, R. & Häußler, P. (Hrsg.). (2015). *Springer-Lehrbuch. Physikdidaktik: Theorie und Praxis* (3. Aufl.). Springer Spektrum. <http://www.worldcat.org/oclc/900616550>
- Klahr, D. & Dunbar, K. (1988). Dual space search during scientific reasoning. *Cognitive Science*, 12(1), 1–48.
- KMK (2004). Bildungsstandards im Fach Physik für den mittleren Schulabschluss: Beschluss der KMK.
- KMK. (2016). *Bildung in der digitalen Welt: Strategie der Kultusministerkonferenz*. Kultusministerkonferenz.  
[https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2016/Bildung\\_digitale\\_Welt\\_Webversion.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2016/Bildung_digitale_Welt_Webversion.pdf)\* [ zuletzt geprüft: 04.04.2018].
- Koc, M. & Bakir, N. (2010). A needs assessment survey to investigate pre-service teachers' knowledge, experiences and perceptions about preparation to using educational technologies. *TOJET: The Turkish Online Journal of Educational Technology*, 9(1).
- Koehler, J. M. & Mishra, P. (2009). What Is Technological Pedagogical Content Knowledge? *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, 9(1), 60–70.
- Koehler, M. J., Mishra, P., Kereluik, K., Shin, T. S [Tae Seob] & Graham, C. R. (2014). The Technological Pedagogical Content Knowledge Framework. In J. M. Spector, M. D. Merrill, J. Elen & M. J. Bishop (Hrsg.), *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (4. Aufl., S. 101–111). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5\\_9](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5_9)
- Koh, J. H. L [Joyce Hwee Ling] & Chai, C. S [Ching Sing] (2016). Seven design frames that teachers use when considering technological pedagogical content knowledge (TPACK). *Computers & Education*, 102, 244–257.
- Kollar, I. & Fischer, F. (2018). Digitale Medien für die Unterstützung von Lehr-/Lernprozessen in der Weiterbildung: Theoretische Ansätze und empirische Befunde. In R. Tippelt & A. von Hippel (Hrsg.), *Handbuch Erwachsenenbildung/Weiterbildung* (S. 1553–1568). Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Kollmann, T. (1998). Akzeptanz innovativer Nutzungsgüter und-systeme [Acceptance of innovative usage products and systems]. *Wiesbaden, Germany: Gabler*.
- Kollmann, T. (2000). Die Messung der Akzeptanz bei Telekommunikationssystemen. *Journal für Betriebswirtschaft*, 50(2), 68–78.
- Kopcha, T. J., Ottenbreit-Leftwich, A., Jung, J. & Baser, D. (2014). Examining the TPACK framework through the convergent and discriminant validity of two measures. *Computers & Education*, 78, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2014.05.003>

- Kotake, K., Sato, K. & Takahashi, K. (2006). Explosion mechanism, neutrino burst and gravitational wave in core-collapse supernovae. *Reports on Progress in Physics*, 69(4), 971–1143.  
<https://doi.org/10.1088/0034-4885/69/4/R03>
- Kozma, R. (1994). Will media influence learning: Reframing the debate.
- Kozma, R. (2003). The material features of multiple representations and their cognitive and social affordances for science understanding. *Learning and Instruction*, 13(2), 205–226.  
[https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00021-X)
- Kraas, C., Strätz, K. & Voss, K. (2010). *Haiti – Katastrophenhilfe aus dem All*. Lehrer online.  
<http://www.lehrer-online.de/haiti-erdbeben.php>\* [ zuletzt geprüft: 14.4.16].
- Kuhn, J [Jochen]. (2013). *iPhysicsLab: Infomaterial* [ zuletzt geprüft: 05.09.2013].
- Kuhn, J [Jochen], Molz, A., Gröber, S. & Frübis, J. (2014). iRadioactivity — Possibilities and Limitations for Using Smartphones and Tablet PCs as Radioactive Counters. *The Physics Teacher*, 52(6), 351–356. <https://doi.org/10.1119/1.4893089>
- Kuhn, J [Jochen] & Vogt, P. (2012a). Analyzing spring pendulum phenomena with a smart-phone acceleration sensor. *The Physics Teacher*, 50(8), 504. <https://doi.org/10.1119/1.4758162>
- Kuhn, J [Jochen] & Vogt, P. (2012b). Diffraction experiments with infrared remote controls. *The Physics Teacher*, 50(2), 118. <https://doi.org/10.1119/1.3677292>
- Kuhn, J [Jochen] & Vogt, P. (2012 ff). iPhysicsLab - Kolumne. *The Physics Teacher*.
- Kuhn, J [Jochen] & Vogt, P. (2013). Analyzing acoustic phenomena with a smartphone microphone. *The Physics Teacher*, 51(2), 118. <https://doi.org/10.1119/1.4775539>
- Kulviwat, S., Bruner II, G. C., Kumar, A., Nasco, S. A. & Clark, T. (2007). Toward a unified theory of consumer acceptance technology. *Psychology and Marketing*, 24(12), 1059–1084.  
<https://doi.org/10.1002/mar.20196>
- Kumpajaya, A. & Dhewanto, W. (2015). The Acceptance of Bitcoin in Indonesia: Extended TAM with IDT. *Journal of Business and Management*, 4(1), 28–38.
- Lächele, J. & Girwidz, R. (2013). *Visualisierungen zum Transformator* [Zulassungsarbeit zum Staatsexamen]. LMU München, München. [https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/multimedia/programme\\_applets/e\\_lehre/visualisierung\\_transformator/index.html](https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/multimedia/programme_applets/e_lehre/visualisierung_transformator/index.html)
- Lange, J. & Merle, H. (2011). Neues Handbuch Hochschullehre. Lehren und Lernen effizient gestalten [Teil] D. Medieneinsatz. Netzbasiertes Lehren und Lernen. In J. Lange & H. Merle (Hrsg.), *Lernen und Arbeiten im Stahlbau-Wiki: Einsatz Neuer Medien im Ingenieurstudium*. Raabe.
- Lattimer, J. M. & Prakash, M. (2004). The Physics of Neutron Stars. *Science*, 304(5670), 536–542.
- Lee, B.-C., Yoon, J.-O. & Lee, I. (2009). Learners' acceptance of e-learning in South Korea: Theories and results. *Computers & Education*, 53(4), 1320–1329.  
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2009.06.014>
- Legris, P., Ingham, J. & Collette, P. (2003). Why do people use information technology? A critical review of the technology acceptance model. *Information & Management*, 40, 191–204.
- Leibundgut, B [Bruno] (2000). Type Ia Supernovae. *Astronomy and Astrophysics Review*, 10(3), 179–209.  
<https://doi.org/10.1007/s001590000009>

- LeiFi Physik. (2017). 2. *Keplersches Gesetz*. [https://www.leifiphysik.de/mechanik/weltbilder-keplersche-gesetze/grundwissen/zweites-keplersches-gesetz\\*](https://www.leifiphysik.de/mechanik/weltbilder-keplersche-gesetze/grundwissen/zweites-keplersches-gesetz*) [ zuletzt geprüft: 01.06.2017].
- Leung, M., Low, R. & Sweller, J. (1997). Learning from equations or words. *Instructional Science*, 25(1), 37–70.
- Leung, S.-C. & Nomoto, K [Ken'ichi] (2020). Explosive Nucleosynthesis in Sub-Chandrasekhar-mass White Dwarf Models for Type Ia Supernovae: Dependence on Model Parameters. *The Astrophysical Journal*, 888(2), 80.
- Lewis, R. A. (1995). Video introductions to laboratory: Students positive, grades unchanged. *American Journal of Physics*, 63(5), 468–470.
- Li, W [Weidong], Chornock, R [Ryan], Leaman, J., Filippenko, A. V [Alexei V.], Poznanski, D., Wang, X [Xiaofeng], Ganeshalingam, M [Mohan] & Mannucci, F. (2011). Nearby supernova rates from the Lick Observatory Supernova Search - III. The rate-size relation, and the rates as a function of galaxy Hubble type and colour. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412(3), 1473–1507. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18162.x>
- Li, W [Weidong], Filippenko, A. V [Alexei V.], Chornock, R [Ryan], Berger, E., Berlind, P [Perry], Calkins, M. L., Challis, P., Fassnacht, C., Jha, S., Kirshner, R. P [Robert P.], Matheson, T [Thomas], Sargent, W. L. W., Simcoe, R. A., Smith, G. H. & Squires, G. (2003). SN 2002cx: The Most Peculiar Known Type Ia Supernova. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 115(806), 453–473. <https://doi.org/10.1086/374200>
- Li, W [Weidong], Leaman, J., Chornock, R [Ryan], Filippenko, A. V [Alexei V.], Poznanski, D., Ganeshalingam, M [Mohan], Wang, X [Xiaofeng], Modjaz, M [Maryam], Jha, S., Foley, R. J. & Smith, N. (2011). Nearby supernova rates from the Lick Observatory Supernova Search - II. The observed luminosity functions and fractions of supernovae in a complete sample. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412(3), 1441–1472. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18160.x>
- Liao, C., Palvia, P. & Chen, J.-L. (2009). Information technology adoption behavior life cycle: Toward a Technology Continuance Theory (TCT). *International Journal of Information Management*, 29(4), 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2009.03.004>
- Lin, H.-H. & Wang, Y.-S. (2005). Predicting Consumer Intention to Use Mobile Commerce in Taiwan. In W. Brookes (Hrsg.), *International Conference on Mobile Business, 2005: ICMB 2005 ; 11 - 13 July 2005, [Crowne Plaza Darling Harbour, Sydney, Australia]* (S. 406–412). IEEE Computer Society. <https://doi.org/10.1109/ICMB.2005.80>
- Liu, D., Wang, B. & Han, Z. (2018). The double-degenerate model for the progenitors of Type Ia supernovae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473(4), 5352–5361. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2756>
- Livio, M. & Mazzali, P. (2018). On the progenitors of Type Ia supernovae. *Physics Reports*, 736, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.02.002>
- Livio, M. & Truran, J. W. (1992). Type I supernovae and accretion-induced collapses from cataclysmic variables?. *The Astrophysical Journal*, 389, 695–703.

- Livne, E. (1990). Successive detonations in accreting white dwarfs as an alternative mechanism for type I supernovae. *The Astrophysical Journal*, 354, L53-L55.
- Lücke, D. (1995). Akzeptanz. *Legitimität in der "Abstimmungsgesellschaft"*. Opladen. Google Scholar.
- Luri, X., Gomez, A. E., Torra, J., Figueras, F. & Mennessier, M. O. (1998). The LMC distance modulus from Hipparcos RR Lyrae and classical Cepheid data. <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/9805215>
- Madore, B. F. & Freedman, W. L. (1991). The Cepheid distance scale. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 103(667), 933ff.
- Mandl, H. & Friedrich, H. F. (1997). Analyse und Förderung selbstgesteuerten lernens. In F. E. Weinert & H. Mandl (Hrsg.), *Psychologie der Erwachsenenbildung (Enzyklopädie der Psychologie Band DI 4)* (S. 237–293). Hogrefe.
- Markauskaite, L., Bachfischer, A., Goodyear, P. & Kali, Y. (2011). Beyond technology, pedagogy and content: Insights into the knowledge bases for collaborative eLearning design. In *Paper accepted for presentation at the American Educational Research Association conference*.
- Matthias Schweinberger. (2017). *Brechung 4: Der Regenbogen*. LMU München. [https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/lehrerbildung/lehrerbildung\\_lmu/video/optik/brechung/brechung4/index.html](https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/lehrerbildung/lehrerbildung_lmu/video/optik/brechung/brechung4/index.html)\* [ zuletzt geprüft: 22.02.2023].
- Mayer, P. & Girwidz, R. (2019). Physics Teachers' Acceptance of Multimedia Applications—Adaptation of the Technology Acceptance Model to Investigate the Influence of TPACK on Physics Teachers' Acceptance Behavior of Multimedia Applications. *Frontiers in Education*, 4, Artikel 73, 71. <https://doi.org/10.3389/educ.2019.00073>
- Mayer, P., Watzka, B. & Girwidz, R. (2021). Steigerung des Akzeptanzverhaltens gegenüber Multimediaanwendungen im Physikunterricht durch eine Fortbildung. *PhyDid A-Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*(20), 26–39. <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/1095/1273>
- Mayer, R. (1997). Multimedia learning: Are we asking the right questions? *Educational Psychologist*, 32(1), 1–19.
- Mayer, R. (Hrsg.). (2014). *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369>
- Mayer, R. E. (1989). Systematic thinking fostered by illustrations in scientific text. *Journal of Educational Psychology*, 81(2), 240–246. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.81.2.240>
- Mayer, R. E. (2001). *Multimedia learning*. Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2002). Multimedia learning. *Psychology of learning and motivation*, 41, 27–29. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/arepj1962/41/0/41\\_27/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/arepj1962/41/0/41_27/_pdf)
- Mayer, R. E. (2004). Should there be a three-strikes rule against pure discovery learning? The case for guided methods of instruction. *The American psychologist*, 59(1), 14–19. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.59.1.14>
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia learning* (2nd ed). Cambridge University Press. <http%3A/www.worldcat.org/oclc/228676642>

- Mayer, R. E. (2014). Incorporating motivation into multimedia learning. *Learning and Instruction, 29*, 171–173.
- Mayer, R. E. & Chandler, P. (2001). When learning is just a click away: Does simple user interaction foster deeper understanding of multimedia messages? *Journal of Educational Psychology, 93*(2), 390–397. <https://doi.org/10.1037//0022-0663.93.2.390>
- Mayer, R. E., Dow, G. & Mayer, S. (2003). Multimedia Learning in an Interactive Self-Explaining Environment: What Works in the Design of Agent-Based Microworlds? *Journal of Educational Psychology, 95*(4), 806–812. <https://gustavus.edu/education/courses/edu241/mayerarticle2.pdf>
- Mayer, R. E., Hegarty, M., Mayer, S. & Campbell, J. (2005). When Static Media Promote Active Learning: Annotated Illustrations Versus Narrated Animations in Multimedia Instruction. *Journal of Experimental Psychology: Applied, 11*(4), 256–265. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.11.4.256>
- Mayer, R. E. & Moreno, R. (2002). Aids to computer-based multimedia learning. *Learning and Instruction, 12*, 107–119. <https://digitalstrategist.typepad.com/Readings/EDBT5501/Mayer%20and%20Moreno.pdf>
- Mazzali, P. A., Benetti, S [S.], Stehle, M., Branch, D [D.], Deng, J., Maeda, K [K.], Nomoto, K [K.] & Hamuy, M [M.] (2005). High-velocity features in the spectra of the Type Ia supernova SN 1999ee: a property of the explosion or evidence of circumstellar interaction? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 357*(1).
- Mazzali, P. A., Röpke, F. K [F. K.], Benetti, S [S.] & Hillebrandt, W [W.] (2007). A common explosion mechanism for type Ia supernovae. *Science, 315*(5831), 825–828.
- McCully, C [Curtis], Jha, S. W., Foley, R. J., Bildsten, L., Fong, W., Kirshner, R. P [Robert P.], Marion, G. H., Riess, A. G [Adam G.] & Stritzinger, M. D. (2014). A luminous, blue progenitor system for the type Ia supernova 2012Z. *Nature, 512*(7512), 54–56. <https://doi.org/10.1038/nature13615>
- Melis, C., Reid, M. J., Mioduszewski, A. J., Stauffer, J. R. & Bower, G. C. (2014). A VLBI resolution of the Pleiades distance controversy. *Science, 345*(6200), 1029–1032. <https://doi.org/10.1126/science.1256101>
- Meyer, H. & Junghans, C. (2022). *Unterrichtsmethoden* (20., komplett überarbeitete Neuauflage). Cornelsen.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological review, 63*(2), 81.
- Mishra, P. & Koehler, J. M. (2006). Technological Pedagogical Content Knowledge: A Framework for Teacher Knowledge. *Teachers College Record, 108*(6).
- Moreno, R. & Mayer, R. (2007). Interactive Multimodal Learning Environments. *Educational Psychology Review, 19*(3), 309–326. <https://doi.org/10.1007/s10648-007-9047-2>
- Moreno, R., Ozogul, G. & Reisslein, M. (2011). Teaching with concrete and abstract visual representations: Effects on students' problem solving, problem representations, and learning perceptions. *Journal of Educational Psychology, 103*(1), 32–47. <https://doi.org/10.1037/a0021995>
- Müller-Böling, D. & Müller, M. (1986). *Akzeptanzfaktoren der Bürokommunikation*. R. Oldenbourg.

- Mummendey, H. D. (1988). *Verhalten und Einstellung: Untersuchung der Einstellungs- und Selbstkonzeptänderung nach Änderung des alltäglichen Verhaltens*.  
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-73549-3>
- Mumtaz, S. (2006). Factors affecting teachers' use of information and communications technology: A review of the literature. *Journal of Information Technology for Teacher Education*, 9(3), 319–342. <https://doi.org/10.1080/14759390000200096>
- Negroponte, N., Harrington, R [Randal], McKay, S. R. & Christian, W. (1997). Being Digital. *Computers in Physics*, 11(3), 261. <https://doi.org/10.1063/1.4822554>
- Nieschlag, R., Dichtl, E. & Hörschgen, H. (2002). Marketing. 19. Auflage, Berlin: Duncker & Humblot. *Messen und Ausstellungen*.
- Niess, M. (2005). Preparing teachers to teach science and mathematics with technology: Developing a technology pedagogical content knowledge. *Teaching and Teacher Education*, 21(5), 509–523. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2005.03.006>
- Niess, M., Browning, C., Driskell, S., Johnston, C. & Harrington, R [Rachel] (2009). Mathematics Teacher TPACK Standards and Revising Teacher Preparation. In I. Gibson, R. Weber, K. McFerrin, R. Carlsen & D. A. Willis (Hrsg.), *Proceedings of Society for Information Technology & Teacher Education International Conference 2009* (S. 3588–3601). Association for the Advancement of Computing in Education (AACE). <https://www.learntechlib.org/p/31207>
- Nomoto, K [Ken'ichi] (1982a). Accreting white dwarf models for type 1 supernovae. II-Off-center detonation supernovae. *The Astrophysical Journal*, 257, 780–792.
- Nomoto, K [Ken'ichi] (1982b). Accreting white dwarf models for type I supernovae. I-Presupernova evolution and triggering mechanisms. *The Astrophysical Journal*, 253, 798–810.
- Nomoto, K [Ken'ichi] (1984). Evolution of 8-10 solar mass stars toward electron capture supernovae. I-Formation of electron-degenerate O+ NE+ MG cores. *The Astrophysical Journal*, 277, 791–805.
- Nomoto, K [Ken'ichi] & Kondo, Y. (1991). Conditions for accretion-induced collapse of white dwarfs. *The Astrophysical Journal*, 367, L19-L22.
- Nomoto, K [Ken'ichi], Saio, H., Kato, M. & Hachisu, I. (2007). Thermal Stability of White Dwarfs Accreting Hydrogen-rich Matter and Progenitors of Type Ia Supernovae. *The Astrophysical Journal*, 663(2), 1269–1276. <https://doi.org/10.1086/518465>
- Nomoto, K [Ken'ichi] & Sugimoto, D. (1977). Rejuvenation of helium white dwarfs by mass accretion. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 29, 765–780.
- Nugent, P. E., Sullivan, M [Mark], Cenko, S. B [S. Bradley], Thomas, R. C [Rollin C.], Kasen, D [Daniel], Howell, D. A [D. Andrew], Bersier, D., Bloom, J. S., Kulkarni, S. R., Kandrashoff, M. T., Filippenko, A. V [Alexei V.], Silverman, J. M [Jeffrey M.], Marcy, G. W., Howard, A. W., Isaacson, H. T., Maguire, K [Kate], Suzuki, N [Nao], Tarlton, J. E., Pan, Y.-C., . . . Poznanski, D. (2011). Supernova SN 2011fe from an exploding carbon-oxygen white dwarf star. *Nature*, 480(7377), 344–347. <https://doi.org/10.1038/nature10644>
- Nussbaum, M., Alcoholado, C. & Büchi, T. (2015). A comparative analysis of interactive arithmetic learning in the classroom and computer lab. *Computers in Human Behavior*, 43, 183–188.

- Ohlmann, S. T., Kromer, M [Markus], Fink, M [Michael], Pakmor, R [Rüdiger], Seitenzahl, I. R [Ivo R.], Sim, S. A [Stuart A.] & Röpke, F. K [Friedrich K.] (2014). The white dwarf's carbon fraction as a secondary parameter of Type Ia supernovae. *Astronomy & Astrophysics*, 572, A57.  
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423924>
- Olbrecht, T. (2010). *Akzeptanz von E-Learning: Eine Auseinandersetzung mit dem Technologieakzeptanzmodell zur Analyse individueller und sozialer Einflussfaktoren*. Jena: Universität, Fakultät für Sozial- und Verhaltenswissenschaften. <http://www.db-thueringen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-21996/Olbrecht/Dissertation.pdf>\* [ zuletzt geprüft: 11.08.2014].
- Paas, F. & Ayres, P. (2014). Cognitive Load Theory: A Broader View on the Role of Memory in Learning and Education. *Educational Psychology Review*, 26(2), 191–195.  
<https://doi.org/10.1007/s10648-014-9263-5>
- Paas, F., Renkl, A. & Sweller, J. (2003). Cognitive Load Theory and Instructional Design: Recent Developments. *Educational Psychologist*, 38(1), 1–4.  
[https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801\\_1](https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_1)
- Paas, F. & Sweller, J. (2014). Implications of Cognitive Load Theory for Multimedia Learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 27–42). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.004>
- Paivio, A. (1990). *Mental representations: A dual coding approach*. Oxford University Press.
- Pajo, K. & Wallace, C. (2001). Barriers To The Uptake Of Web-based Technology By University Teachers. *International Journal of E-Learning & Distance Education*, 16(1), 70–84.
- Pakmor, R [R.], Hachinger, S., Röpke, F. K [F. K.] & Hillebrandt, W [W.] (2011). Violent mergers of nearly equal-mass white dwarf as progenitors of subluminous Type Ia supernovae. *Astronomy & Astrophysics*, 528, A117. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015653>
- Panda, S. & Mishra, S. (2007). E-Learning in a Mega Open University: Faculty attitude, barriers and motivators. *Educational Media International*, 44(4), 323–338.
- Park, O.-C. & Hopkins, R. (1993). Instructional conditions for using dynamic visual displays: A review. *Instructional Science*, 21(6), 427–449. <https://doi.org/10.1007/BF00118557>
- Patat, F., Benetti, S [S.], Cappellaro, E., Danziger, I. J., Della Valle, M., Mazzali, P. A. & Turatto, M. (1996). The type Ia supernova 1994D in NGC 4526: the early phases. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 278(1), 111–124.
- Peek, S. T. M., Wouters, E. J. M., van Hoof, J., Luijckx, K. G., Boeije, H. R. & Vrijhoef, H. J. M. (2014). Factors influencing acceptance of technology for aging in place: A systematic review. *International journal of medical informatics*, 83(4), 235–248.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2014.01.004>
- Perkins, K., Paul, A., Blanco, J., Dubson, M. & Loeblein, Patricia. (2014). *Balanceakt* [Phet]. University of Colorado. <https://phet.colorado.edu/de/simulation/balancing-act>\* [ zuletzt geprüft: 23.03.2023].

- Perlmutter, S [Saul], Aldering, G., Goldhaber, G., Knop, R. A., Nugent, P., Castro, P. G., Deustua, S., Fabbro, S [Sebastien], Goobar, A., Groom, D. E. & others (1999). Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 high-redshift supernovae. *The Astrophysical Journal*, 517(2), 565.
- Petermann, T. & Scherz, C. (2005). Parlamentarische TA-Einrichtungen in Europa als reflexive Institutionen. *Technikfolgen-Abschätzung für den Deutschen Bundestag. Das TAB-Erfahrungen und Perspektiven wissenschaftlicher Politikberatung*, 271–294.
- Pietrzyński, G., Graczyk, D., Gieren, W., Thompson, I. B., Pilecki, B., Udalski, A., Soszyński, I., Kozłowski, S., Konorski, P., Suchomska, K. & others (2013). An eclipsing-binary distance to the Large Magellanic Cloud accurate to two per cent. *Nature*, 495(7439), 76.
- Plass, J. L., Moreno, R. & Brünken, R. (Hrsg.). (2010). *Cognitive load theory*. Cambridge Univ. Press.
- Plies, K. & Schmidt, P. (1996). Intention= verhalten? Eine repräsentative längsschnittstudie zur Überprüfung der theorie des geplanten verhaltens im kontext der aids-prävention. *Zeitschrift für Sozialpsychologie*, 27(1), 70–80.
- Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrović, V. M. & Jovanović, K. (2016). Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review. *Computers & Education*, 95, 309–327. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002>
- Pressmar, D. B. (1982). Zur Akzeptanz von computergestützten Planungssystemen. In *Unternehmensplanung und-steuerung in den 80er Jahren* (S. 324–348). Springer.
- Pröbstle, Y. (2014). *Kulturtouristen*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-05430-4>
- Rasch, B., Frieze, M., Hofmann, W [Wilhelm] & Naumann, E. (Hrsg.). (2014a). *Springer-Lehrbuch. Quantitative Methoden 1: Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler* (4. Aufl.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43524-3>
- Rasch, B., Frieze, M., Hofmann, W [Wilhelm] & Naumann, E. (2014b). *Quantitative Methoden 2*. Springer Berlin Heidelberg. <https://link-springer-com.emedien.ub.uni-muenchen.de/content/pdf/10.1007%2F978-3-662-43548-9.pdf> <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43548-9>
- Rebassa-Mansergas, A., Toonen, S., Korol, V. & Torres, S. (2019). Where are the double-degenerate progenitors of Type Ia supernovae? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 482(3), 3656–3668.
- Reinecke, J., Schmidt, P. & Ajzen, I [Icek] (1997). Kondom oder kein Kondom bei neuen sexuellen Kontakten? Erklärung und Vorhersage mit der Theorie geplanten Verhaltens im Längsschnitt. *Zeitschrift für Sozialpsychologie*, 28.
- Rey, G. D. (2011). Interactive elements for dynamically linked multiple representations in computer simulations. *Applied Cognitive Psychology*, 25(1), 12–19. <https://doi.org/10.1002/acp.1633>
- Richtberg, S. (2018). *Elektronenbahnen in Feldern* [Dissertation, Logos Verlag Berlin GmbH]. GBV Gemeinsamer Bibliotheksverbund.
- Riess, A. G [Adam G.], Filippenko, A. V [Alexei V.], Challis, P., Clocchiatti, A., Diercks, A., Garnavich, P. M [Peter M.], Gilliland, R. L., Hogan, C. J., Jha, S., Kirshner, R. P [Robert P.] & others (1998).

- Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *The Astronomical Journal*, 116(3), 1009.
- Riess, A. G [Adam G.], Press, W. H. & Kirshner, R. P [R. P.] (1996). A precise distance indicator: Type Ia supernova multicolor light-curve shapes. *The Astrophysical Journal*, 473(1), 88ff.
- Riess, A. G [Adam G.], Strolger, L.-G., Casertano, S., Ferguson, H. C., Mobasher, B., Gold, B., Challis, P. J., Filippenko, A. V [Alexei V.], Jha, S., Li, W [Weidong], Tonry, J., Foley, R., Kirshner, R. P [Robert P.], Dickinson, M., MacDonald, E., Eisenstein, D., Livio, M., Younger, J., Xu, C., . . . Stern, D. (2007). New Hubble Space Telescope Discoveries of Type Ia Supernovae at  $z \geq 1$ : Narrowing Constraints on the Early Behavior of Dark Energy. *The Astrophysical Journal*, 659(1), 98–121.  
<https://doi.org/10.1086/510378>
- Ritossa, C., Garcia-Berro, E [Enrique] & Iben Jr, I [Icko] (1996). On the Evolution of Stars That Form Electron-degenerate Cores Processed by Carbon Burning. II. Isotope Abundances and Thermal Pulses in a 10 Msun Model with an ONe Core and Applications to Long-Period Variables, Classical Novae, and Accretion-induced Collapse. *The Astrophysical Journal*, 460, 489.
- Robey, D. (1979). User attitudes and management information system use. *Academy of Management Journal*, 22(3), 527–538.
- Röpke, F. K [F. K.], Seitenzahl, I. R [I. R.], Benitez, S., Fink, M [M.], Pakmor, R [R.], Kromer, M [M.], Sim, S. A [S. A.], Ciaraldi-Schoolmann, F. & Hillebrandt, W [W.] (2011). Modeling Type Ia supernova explosions. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 66(2), 309–318.  
<https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2011.01.026>
- Rosch, M. & Frey, D [Dieter] (1997). Soziale Einstellungen. *Sozialpsychologie. Ein Handbuch in Schlüsselbegriffen*, 296–305.
- Rouinfar, A., Reid, S., Podolefsky, N., Loeblein, T., Paul, A. & Perkins, K. (2004-2016). *Lichtbrechung*. [https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light\\_de.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light_de.html)\* [ zuletzt geprüft: 22.02.2023].
- Rubitzko, T. (2008). Aktives Lernen mit multiplen Repräsentationen-Zur Vermittlung komplexer physikalischer Inhalte mit Texten, Bildern, Animationen und Simulationen.
- Sailer, M., Murböck, J. & Fischer, F. (2017). Digitale Bildung an bayerischen Schulen-Infrastruktur, Konzepte, Lehrerbildung und Unterricht.
- Saio, H. & Nomoto, K [Ken'ichi] (1985). Evolution of a merging pair of C+ O white dwarfs to form a single neutron star. *Astronomy and Astrophysics*, 150, L21-L23.
- Saio, H. & Nomoto, K [Ken'ichi] (2004). Off-Center Carbon Ignition in Rapidly Rotating, Accreting Carbon-Oxygen White Dwarfs. *The Astrophysical Journal*, 615(1), 444–449.  
<https://doi.org/10.1086/423976>
- Salomon, G., Perkins, D. N. & Globerson, T. (1991). Partners in Cognition: Extending Human Intelligence with Intelligent Technologies. *Educational Researcher*, 20(3), 2–9.  
<https://pdfs.semanticscholar.org/75f1/475234456c347dec600d880e06a0a99170c0.pdf>
- Sato, Y., Nakasato, N., Tanikawa, A., Nomoto, K [Ken'ichi], Maeda, K [Keiichi] & Hachisu, I. (2015). A systematic study of carbon–oxygen white dwarf mergers: mass combinations for type Ia

- supernovae. *The Astrophysical Journal*, 807(1), 105. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/807/1/105>
- Savelsbergh, E. R. & Jong, d. T. (1998). Competence-Related Differences in Problem Representations: A Study of Physics Problem Solving, 263–282.
- Scheiter, K. & Lachner, A. (2019). DigitalPakt-was nun? Eine Positionierung aus Sicht der Lehr-Lernforschung. *Unterrichtswissenschaft*, 47(4), 547–564.
- Schepers, J. & Wetzels, M. (2007). A meta-analysis of the technology acceptance model: Investigating subjective norm and moderation effects. *Information & Management*, 44(1), 90–103. <https://doi.org/10.1016/j.im.2006.10.007>
- Schierz, P. G. (2008). *Akzeptanz von mobilen Zahlungssystemen: Eine empirische Analyse basierend auf dem Technologieakzeptanzmodell*. Kovač.
- Schlegel, E. M. (1990). A new subclass of Type II Supernovae? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 244, 269–271.
- Schmidt, D. A., Baran, E., Thompson, A. D., Mishra, P., Koehler, J. M. & Shin, T. S [Tae S.] (2009). Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK): The Development and Validation of an Assessment Instrument for Preservice Teachers. *Journal of Research on Technology in Education (JRTE)*, 42(2), 123–149.
- Schneider, M. (2011). *Weitsichtigkeit des Auges*. Geogebra. [https://www.geogebra.org/m/ws7HsgPG#material/fPbPexA8\\*](https://www.geogebra.org/m/ws7HsgPG#material/fPbPexA8*) [ zuletzt geprüft: 18.4.21].
- Schnotz, W. & Bannert, M. (1999). Einflüsse der Visualisierungsform auf die Konstruktion mentaler Modelle beim Text- und Bildverstehen. *Zeitschrift für experimentelle Psychologie*.
- Schnotz, W. & Bannert, M. (2003). Construction and interference in learning from multiple representation. *Learning and Instruction*, 13(2), 141–156. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00017-8)
- Schnotz, W. & Kürschner, C. (2008). External and internal representations in the acquisition and use of knowledge: Visualization effects on mental model construction. *Instructional Science*, 36(3), 175–190. <https://doi.org/10.1007/s11251-007-9029-2>
- Schreiber, N., Theyßen, H. & Dickmann, M. (2016). Wie genau beurteilen Schülerinnen und Schüler ihre eigenen. *PhyDid A-Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*(1/15), 49–63.
- Schreiber, N., Theyßen, H. & Schecker, H. (2014). Diagnostik experimenteller Kompetenz: Kann man Realexperimente durch Simulationen ersetzen? *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 20(1), 161–173. <https://doi.org/10.1007/s40573-014-0017-1>
- Schulmeister, R. (1997). *Grundlagen hypermedialer Lernsysteme: [Theorie - Didaktik - Design]* (2., aktualisierte Aufl.). Oldenbourg.
- Schweinberger, M. & Girwidz, R. (2017). Förderung angehender Physiklehrer durch die Arbeit mit stummen Videos. In C. Maurer (Hrsg.), *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis: GDCP Jahrestagung 2016* (Bd. 37, S. 680–683). Universität Regensburg.
- Schweinberger, M. & Girwidz, R. (2021). "Silent Videoclips" for teacher enhancement and physics in class - material and training wheels (im Druck).

- Schweinberger, M., Mayer, P. & Girwidz, R. (2017). Training der Präsentationskompetenz mit stummen Videos. *PhyDid B -Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG Frühjahrstagung*.
- Schwippert, K. (2002). Verfahren zum Ersetzen fehlender Daten: Ein anwendungsbezogenes Beispiel zum Hot-Deck-Verfahren. *Zeitschrift für Theorie und Praxis erziehungswissenschaftlicher Forschung*, 16(4), 509–532 (Forschungsmethoden).
- Schwippert, K., Eickelmann, B., Bos, W., Goldhammer, F., Schaumburg, H. & Gerick, J. (2014). *ICILS 2013*. Waxmann Verlag.
- Shen, K. J., Kasen, D [Daniel], Miles, B. J. & Townsley, D. M. (2018). Sub-Chandrasekhar-mass White Dwarf Detonations Revisited. *The Astrophysical Journal*, 854(1), 52.  
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaa8de>
- Shigeyama, T., Nomoto, K [Ken'ichi], Yamaoka, H. & Thielemann, F.-K. (1992). Possible models for the type Ia supernova 1990N. *The Astrophysical Journal*, 386, L13-L16.
- Shivvers, I., Modjaz, M [Maryam], Zheng, W., Liu, Y., Filippenko, A. V [Alexei V.], Silverman, J. M [Jeffrey M.], Matheson, T [Thomas], Pastorello, A [Andrea], Graur, O., Foley, R. J., Chornock, R [Ryan], Smith, N., Leaman, J. & Benetti, S [Stefano] (2017). Revisiting the Lick Observatory Supernova Search Volume-limited Sample: Updated Classifications and Revised Stripped-envelope Supernova Fractions. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 129(975), 54201.  
<https://doi.org/10.1088/1538-3873/aa54a6>
- Shulman, L. (1987). Knowledge and Teaching: Foundations of the New Reform. *Harvard Educational Review*, 57(1), 1–23. <https://doi.org/10.17763/haer.57.1.j463w79r56455411>
- Shulman, L. S. (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. *Educational Researcher*, 15(2), 4–14.
- Shultz, R. L. & Slevin, D. P. (1975). Implementing Operations Research. *Management Science*.
- Sim, S. A [S. A.], Röpke, F. K [F. K.], Hillebrandt, W [W.], Kromer, M [M.], Pakmor, R [R.], Fink, M [M.], Ruiter, A. J. & Seitenzahl, I. R [I. R.] (2010). Detonations in sub-chandrasekhar-mass C+O white dwarfs. *The Astrophysical Journal*, 714(1), L52-L57. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/714/1/L52>
- Soderblom, D., Nelan, E, Benedict, F., Arthur, B. & Jones, B. (2004). *Pleiades, NGC 1432/35, M45*. NASA, ESA, AURA/Caltech, Palomar Observatory. <https://hubblesite.org/contents/news-releases/2004/news-2004-20.html>\* [ zuletzt geprüft: 19.6.21].
- Spanjers, I. A. E., van Gog, T., Wouters, P. & van Merriënboer, J. J. G. (2012). Explaining the segmentation effect in learning from animations: The role of pausing and temporal cueing. *Computers & Education*, 59(2), 274–280.
- Spiro, R. J. & Jehng, J.-C. (1990). Cognitive Flexibility and Hypertext: Theory and Technology for the Nonlinear and Multidimensional Traversal of Complex Subject Matter. *Cognition, Education, and Multimedia: Exploring Ideas in High Technology*, 163.
- Spiro, Rand J. Coulson, Feltovich, Anderson (1988). Cognitive Flexibility Theory: Advanced Knowledge Acquisition in ILL-Structured Domains.
- Stadtfeld, P. (2004). *Allgemeine Didaktik und neue Medien: Der Einfluß der Neuen Medien auf didaktische Theorie und Praxis*. Vollst. zugl.: Düsseldorf, Univ., Habil-Schr., 2003. Klinkhardt.

- StMUK Bayern. (2004). *Lehrplan Gymnasium Bayern: Fassung vom August 2012* [gültig bis September 2023]. ISB Bayern. [https://www.gym8-lehrplan.bayern.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/id\\_27147.html](https://www.gym8-lehrplan.bayern.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/id_27147.html)\* [ zuletzt geprüft: 23.03.2023].
- Stritzinger, M. & Leibundgut, B [B.] (2005). Lower limits on the Hubble constant from models of type Ia supernovae. *Astronomy & Astrophysics*, *431*(2), 423–431. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041630>
- Strzys, M. P., Kapp, S., Thees, M [M.], Kuhn, J [J.], Lukowicz, P., Knierim, P. & Schmidt, A. (2017). Augmenting the thermal flux experiment: A mixed reality approach with the HoloLens. *The Physics Teacher*, *55*(6), 376–377. <https://doi.org/10.1119/1.4999739>
- Sweller, J. (1988). Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning. *Cognitive Science*, *12*(2), 257–285. [https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202\\_4](https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4)
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, *4*(4), 295–312. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90003-5)
- Sweller, J. (2002). Visualisation and Instructional Design. *Proceedings of the International Workshop on Dynamic Visualizations and Learning*, 1501–1510.
- Sweller, J., Ayres, P. & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive Load Theory* (1. Aufl.). *Explorations in the Learning Sciences, Instructional Systems and Performance Technologies: Bd. 1*. Springer Science+Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4> <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4>
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G. & Paas, F. G. W. C. (1998). Cognitive Architecture and Instructional Design. *Educational Psychology Review*, *10*(3), 251–296. <https://doi.org/10.1023/A:1022193728205>
- Tanikawa, T., Ohnishi, K., Kanoh, M., Mukai, T. & Matsuoka, T. (2018). Three-dimensional imaging of threading dislocations in GaN crystals using two-photon excitation photoluminescence. *Applied Physics Express*, *11*(3), 31004.
- Tesch, M. & Duit, R. (2004). Experimentieren im Physikunterricht – Ergebnisse einer Videostudie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *10*, 51–69.
- Thees, M [Michael], Hochberg, K., Kuhn, J [Jochen] & Aeschlimann, M. (2017). Adaptation of acoustic model experiments of STM via smartphones and tablets. *The Physics Teacher*, *55*(7), 436–437.
- Thompson, P. (2013). The digital natives as learners: Technology use patterns and approaches to learning. *Computers & Education*, *65*, 12–33. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.12.022>
- Thoms, L.-J. & Girwidz, R. (2017). Experiments on optical spectrometry in the VirtualRemoteLab. In *2017 4th Experiment@International Conference (exp.at'17)*.
- Thong, J. Y. L., Venkatesh, V., Xu, X., Hong, S.-J. & Tam, K. Y. (2011). Consumer Acceptance of Personal Information and Communication Technology Services. *IEEE Transactions on Engineering Management*, *58*(4), 613–625. <https://doi.org/10.1109/TEM.2010.2058851>
- Tondeur, J [Jo], van Braak, J [Johan], Sang, G., Voogt, J [Joke], Fisser, P [Petra] & Ottenbreit-Leftwich, A. (2012). Preparing pre-service teachers to integrate technology in education: A synthesis of qualitative evidence. *Computers & Education*, *59*(1), 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.10.009>

- Truran, J. W., Arnett, W. D. & Cameron, A. G. W. (1967). Nucleosynthesis in supernova shock waves. *Canadian Journal of Physics*, 45(7), 2315–2332.
- Turner, D. G. (1996). The Progenitors of Classical Cepheid Variables. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 90, 82ff.
- Turner, D. G. (2010). The PL calibration for Milky Way Cepheids and its implications for the distance scale. *Astrophysics and Space Science*, 326(2), 219–231. <https://doi.org/10.1007/s10509-009-0258-5>
- Turner, M., Kitchenham, B., Brereton, P., Charters, S. & Budgen, D. (2010). Does the technology acceptance model predict actual use? A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 52(5), 463–479. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2009.11.005>
- Tversky, B., Morrison, J. B. & Betrancourt, M. (2002). Animation: can it facilitate? *International Journal of Human-Computer Studies*, 57(4), 247–262.
- UNESCO (2008). ICT competency standards for teachers: policy framework (Policy Framework).
- Urban, D. & Mayerl, J. (2018). *Angewandte Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Praxis*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-01915-0>
- Uzunboylu, H. & Tuncay, N. (2010). Divergence of Digital World of Teachers. *Educational Technology & Society*, 13(1), 186–194.
- van der Meij, J. & Jong, T. de (2006). Supporting students' learning with multiple representations in a dynamic simulation-based learning environment. *Learning and Instruction*, 16(3), 199–212.
- van Merriënboer, J. J. G. & Kester, L. (2014). The Four-Component Instructional Design Model: Multimedia Principles in Environments for Complex Learning: Multimedia Principles in Environments for Complex Learning. In R. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. Cambridge University Press.
- Venkatesh, V. & Bala, H. (2008). Technology Acceptance Model 3 and a Research Agenda on Interventions. *Decision Sciences*, 39(2), 273–315. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2008.00192.x>
- Venkatesh, V. & Brown, S. A. (2001). A longitudinal investigation of personal computers in homes: Adoption determinants and emerging challenges. *MIS Quarterly*, 71–102.
- Venkatesh, V. & Davis, F. D. (2000). A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies. *Management Science*, 46(2), 186–204. <https://doi.org/10.1287/mnsc.46.2.186.11926>
- Venkatesh, V., Davis, F. D. & Morris, M. G. (2007). Dead or alive? The development, trajectory and future of technology adoption research. *Journal of the association for information systems*, 8(4), 267.
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B. & Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology: Toward a unified view. *MIS Quarterly*, 425–478.
- Vogelsang, C., Finger, A., Laumann, D. & Thyssen, C. (2019). Vorerfahrungen, Einstellungen und motivationale Orientierungen als mögliche Einflussfaktoren auf den Einsatz digitaler Werkzeuge im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 25(1), 115–129. <https://doi.org/10.1007/s40573-019-00095-6>

- Voogt, J [J.], Fisser, P [P.], Roblin, N. P., Tondeur, J [J.] & van Braak, J [J.] (2013). Technological pedagogical content knowledge – a review of the literature. *Journal of Computer Assisted Learning*, 29. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.2012.00487.x>
- Wallerstein, G. (2002). The Cepheids of Population II and Related Stars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 114(797), 689–699. <https://doi.org/10.1086/341698>
- Walter Fendt. (2000). *Zweites Keplersches Gesetz*. [https://www.walter-fendt.de/html5/phde/keplerlaw2\\_de.htm](https://www.walter-fendt.de/html5/phde/keplerlaw2_de.htm)\* [ zuletzt geprüft: 20.01.2020].
- Wang, Q. (2008). A generic model for guiding the integration of ICT into teaching and learning. *Innovations in Education and Teaching International*, 45(4), 411–419. <https://doi.org/10.1080/14703290802377307>
- Ward, C., Fischer, R., Zaid Lam, F. S. & Hall, L. (2008). The Convergent, Discriminant, and Incremental Validity of Scores on a Self-Report Measure of Cultural Intelligence. *Educational and Psychological Measurement*, 69(1), 85–105. <https://doi.org/10.1177/0013164408322001>
- Webbink, R. F. (1984). Double white dwarfs as progenitors of R Coronae Borealis stars and Type I supernovae. *The Astrophysical Journal*, 277, 355–360.
- Wegner, G. & Swanson, S. R. (1996). Early spectra of the supernova 1987F, 278(1), 22–38.
- Weise, G. (1975). *Psychologische Leistungstests: Ein Handbuch für Studium und Praxis. 1. Intelligenz, Konzentration, spezielle Fähigkeiten*. Verlag für Psychologie, Hogrefe.
- Wellington, J. J. (1988). Computer education in secondary schools: an electronic survey. *Journal of Computer Assisted Learning*, 4(1), 22–33.
- Whelan, J. & Iben Jr, I [Icko] (1973). Binaries and supernovae of type I. *The Astrophysical Journal*, 186, 1007–1014.
- Wilhelm, T. (2007). Konzeption einer erfolgreichen Lehrerfortbildung. In D. Höttecke (Hrsg.), *Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik: Bd. 27. Naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich, : Jahrestagung der GDCP in Bern 2006* (S. 530–532). Lit-Verlag.
- Wingo, N. P., Ivankova, N. V. & Moss, J. A. (2017). Faculty Perceptions about Teaching Online: Exploring the Literature Using the Technology Acceptance Model as an Organizing Framework. *Online Learning*, 21(1). <https://doi.org/10.24059/olj.v21i1.761>
- Wittrock, M. C. (1974). Learning as a generative process. *Educational Psychologist*, 11(2), 87–95.
- Wittrock, M. C. (1989). Generative processes of comprehension. *Educational Psychologist*, 24(4), 345–376.
- Wong, D., Poo, S. P., Hock, N. E. & Kang, W. L. (2011). Learning with multiple representations: An example of a revision lesson in mechanics. *Physics Education*, 46(2), 178–186. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/46/2/005>
- Wood-Vasey, W. M., Friedman, A. S., Bloom, J. S., Hicken, M., Modjaz, M [Maryam], Kirshner, R. P [Robert P.], Starr, D. L., Blake, C. H., Falco, E. E., Szentgyorgyi, A. H., Challis, P., Blondin, S [Stéphane], Mandel, K. S [Kaisey S.] & Rest, A. (2008). Type Ia Supernovae Are Good Standard Candles in the Near Infrared: Evidence from PAIRTEL. *The Astrophysical Journal*, 689(1), 377–390. <https://doi.org/10.1086/592374>

- Woosley, S. E., Taam, R. E., & Weaver, T. A. (1986). Models for Type I supernova. I-Detonations in white dwarfs. *The Astrophysical Journal*, 301, 601–623.
- Wu, B. & Zhang, C. (2014). Empirical study on continuance intentions towards E-Learning 2.0 systems. *Behaviour & Information Technology*, 33(10), 1027–1038.  
<https://doi.org/10.1080/0144929X.2014.934291>
- Wu, J. & Du Hongwei (2012). Toward a better understanding of behavioral intention and system usage constructs. *European Journal of Information Systems*, 21(6), 680–698.  
<https://doi.org/10.1057/ejis.2012.15>
- Young, J. J., Sunyoung, P. & Eugene, L. (2018). Factors Influencing Preservice Teachers' Intention to Use Technology:: TPACK, Teacher Self-efficacy, and Technology Acceptance Model. *Journal of Educational Technology & Society*, 21(3), 48–59.
- Yousafzai, S. Y., Foxall, G. R. & Pallister, J. G. (2007). Technology acceptance: A meta-analysis of the TAM: Part 2. *Journal of Modelling in Management*, 2(3), 281–304.  
<https://doi.org/10.1108/17465660710834462>
- Zheng, K., Padman, R., Johnson, M. P. & Diamond, H. S. (2007). Evaluation of Healthcare IT Applications: The User Acceptance Perspective. In S. Vaidya, L. C. Jain & H. Yoshida (Hrsg.), *Advanced Computational Intelligence Paradigms in Healthcare-2* (S. 49–78). Springer Berlin Heidelberg.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-540-72375-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-72375-2_4)

## 9. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Technology Acceptance Model (TAM) (Davis, Bagozzi & Warshaw, 1989, S. 985).....	15
Abbildung 2: Theorie des geplanten Verhaltens (eigene Grafik nach Fishbein & Ajzen, 1975) .....	20
Abbildung 3: Technology Acceptance Model (TAM) (Davis, Bagozzi & Warshaw, 1989, S. 985).....	23
Abbildung 4: Variante des UTAUT(TAM2)-Modells (eigene Darstellung nach (Venkatesh et al., 2003, 435ff)):	29
Abbildung 5: TPACK-Framework (Mishra & Koehler, 2006, S. 1025) .....	35
Abbildung 6: Modell der Theorie des Multimedialen Lernens (R. E. Mayer, 2009, S. 61).....	50
Abbildung 7: Variante des UTAUT(TAM2)-Modells; Grundlage der Adaption (eigene Darstellung).....	59
Abbildung 8: Adaptiertes Basismodell dieser Studie (eigene Darstellung) .....	60
Abbildung 9: Erweiterung des Basismodells dieser Studie um den Einflussfaktor TPACK (eigene Darstellung).....	62
Abbildung 10: Folie zur Begriffsdefinition (eigene Darstellung; Screenshot aus PUMA@LMU).....	67
Abbildung 11: Multiple Repräsentationen im Physikunterricht am Beispiel Brechung an einem Grenzübergang optisch dünn zu dicht und optisch dicht zu dünn. ( Screenshot links: Matthias Schweinberger (2017); Screenshot rechts: Rouinfar et al. (2004-2016) .....	70
Abbildung 12: Multimediaprinzip zur lernwirksamen Gestaltung multimedialer Lernumgebungen mit Beispielanwendung von Richtberg (2018).....	72
Abbildung 13: Das Kontiguitätsprinzip zur gleichzeitigen Präsentation von Bild- und Audioinhalten (Lächele, 2013).....	73
Abbildung 14: Das Redundanzprinzip – Negativ- und Positiv-Beispiele. Hover-Elemente mit Hinweistexten erstellt mit PUMA@LMU (Originalbild oben: DLR (2010); selbst bearbeitete Version unten) .....	75
Abbildung 15: Das Personalisierungsprinzip.....	76
Abbildung 16: Das Segmentierungsprinzip zur Aufteilung eines großen, übergeordneten Zusammenhanges in kleine, weitgehend abgeschlossene Sinnzusammenhänge (eigene Animation nach GSR, o.D.) .....	77
Abbildung 17: „Media Include“ zum schnellen und einfachen Einbinden von Bildern und Simulationen (eigene Darstellung mit Screenshot von Wikipedia) .....	78
Abbildung 18: Multiple-Choice-Arbeitsaufträge zur Verifizierung von Aussagen (eigene Darstellung) ....	79
Abbildung 19: Erstellen einer Videovertonungsfolie in drei Schritten: Video auswählen, Titel vergeben und Aufgabentext verfassen (Videoquelle: Schweinberger et al., 2017; Schweinberger & Girwidz, 2017, 2021) .....	85
Abbildung 20: Modalbox mit individualisierbaren Bearbeitungshinweisen (eigene Darstellung) .....	86
Abbildung 21: Vertonung von Stummfilmen von Experimenten zur Förderung der Kommunikationskompetenz von Studierenden und Schülerinnen und Schülern (Videoquelle: Schweinberger et al., 2017; Schweinberger & Girwidz, 2017, 2021) .....	87
Abbildung 22: Auflistung aller abgegebenen Vertonungen .....	88
Abbildung 23: Grunddesign einer Präsentationsfolie (eigene Darstellung) .....	89
Abbildung 24: Auswahl eines Schnellbausteins aus einem Dropdown-Feld (eigene Darstellung).....	89

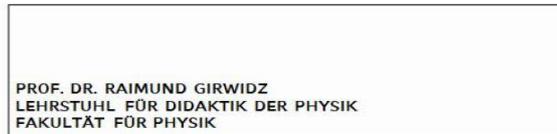
Abbildung 25: Erste Demonstrationsfolie, mit der grundlegende Funktionen beim Umgang mit dem Texteditor vorgestellt werden. Dabei geht es nicht zuletzt auch um den Upload von Bildern (LeiFi Physik, 2017) .....	91
Abbildung 26: Mit der zweiten Tutorial-Folie werden Text und Simulationen bzw. Animationen oder Videos miteinander kombiniert (Bild: Walter Fendt, 2000) .....	91
Abbildung 27: Präsentationsfolien bieten beispielsweise die Möglichkeit der Kombination von Simulationen und Multiple-Choice-Aufgaben. Die Lösung dieser Aufgaben erhalten die Schülerinnen und Schüler sofort nach einem Klick auf ‚Abgeben‘ (Simulation: Perkins et al., 2014) .....	92
Abbildung 28: In der vierten, zweigeteilten Tutorial-Folie lernen die Teilnehmerinnen und Teilnehmer weitere Bausteine kennen. Darunter finden sich WordClouds (links oben), Abstimmungen (rechts unten) und der Baustein ‚Webseite einbinden‘ (Fischerbild: Eigendarstellung; Abbildung Auge: Schneider, 2011) .....	94
Abbildung 29: Gaia Hertzsprung-Russell-Diagramme (Babusiaux et al., 2018, 17) .....	101
Abbildung 30: Webapplikation zur Anzeige von HRDs verschiedener Sternhaufen. Gleichzeitig wird den Schülerinnen und Schülern auch eine originale Teleskopaufnahme angezeigt. Mit den Schaltern A und B lassen sich Hilfslinien sowie der Verlauf der Hauptreihe bei der absoluten Helligkeit einblenden (Bild rechts: Soderblom et al., 2004, o.S.; Bild links: eigene Darstellung) .....	107
Abbildung 31: Lichtkurve eines Delta-Cepheiden (eigene Darstellung erstellt aus den online Daten der Gaia-Mission; Gaia Collaboration et al., 2018) .....	109
Abbildung 32: Webapplikation zur Ermittlung der Gleichung der Ausgleichsgeraden in der Periode-Helligkeits-Beziehung von $\delta$ -Cepheiden (eigene Darstellung erstellt aus den online Daten der Gaia-Mission; Gaia Collaboration et al., 2018) .....	112
Abbildung 33: Periode-Helligkeits-Beziehung .....	112
Abbildung 34: Webapplikation zur Ermittlung der Periodendauer und der mittleren, scheinbaren Helligkeit des $\delta$ -Cepheiden (eigene Darstellung erstellt aus den online Daten der Gaia-Mission; Gaia Collaboration et al., 2018) .....	113
Abbildung 35: Vereinfachte Klassifizierung der Hauptklassen von Supernovae nach Li, Leaman et al. (2011). Da sich die Spektren einer Supernova im Laufe der Zeit verändern, werden für die Klassifizierung die Spektren während des Helligkeitsmaximums verwendet. (eigene Darstellung nach ) .....	116
Abbildung 36: Die Lichtkurve im I-Band weist einen deutlichen zweiten Peak auf. ....	121
Abbildung 37: Es sind deutliche Silizium-Linien sowie Calcium-Linien erkennbar. Die Silizium-Linien sind zudem stark blauverschoben. ....	121
Abbildung 38: Die Silizium-Linien sind weiter deutlich erkennbar. Jedoch hat die Blauverschiebung deutlich abgenommen. Waren es zwölf Tage vor dem Zeitpunkt der maximalen Helligkeit noch etwa 271 Å, sind es nun nur noch 232 Å. ....	123
Abbildung 39: Eisen-Linien, die in der Zeit vor und um das Maximum Light nicht zu sehen waren, sind nun deutlich ausgeprägt. Die Blauverschiebung der Silizium-Linien nimmt weiter ab. ....	123
Abbildung 40: Supernova Typ Ia – Si-Absorptions- und Emissionslinien sind zum Zeitpunkt des <i>Maximum Light</i> deutlich erkennbar. Die Stärke der Ausprägung nimmt in den Tagen danach weiter zu (z. B. Branch et al., 2004). ....	128

Abbildung 41: Supernova Typ Ib – Si-Linien sind schwach ausgeprägt. Stattdessen sind He-Linien deutlich erkennbar, die mit fortschreitender Zeit nach dem <i>Maximum Light</i> immer stärker ausgeprägt waren (z. B. Branch et al., 2002; Kotake et al., 2006).....	129
Abbildung 42: Supernova Typ Ic – Weder H-, He- noch Si-Linien sind zum Zeitpunkt des <i>Maximum Light</i> deutlich erkennbar (Branch et al., 2006; Filippenko, 1997; Kotake et al., 2006). ....	129
Abbildung 43: Supernova Typ II – Wasserstofflinien sind bereits früh deutlich erkennbar. Mit zunehmender Zeit nach dem <i>Maximum Light</i> nimmt die Intensität weiter zu (Kotake et al., 2006). ....	130
Abbildung 44: Mit der Applikation ‚Spektrum analysieren‘ ermittelte Dopplerverschiebung der Wellenlänge $\lambda_{Si II} = 6355 \text{ \AA}$ .....	131
Abbildung 45: Lichtkurve inklusive Vergleich der scheinbaren maximalen Helligkeit mit der erwarteten maximalen absoluten Helligkeit der Supernova 1994D im visuellem Band. ....	132
Abbildung 46: Adaptiertes TAM2-Modell (Konzeptmodell) Blau markiert sind Änderungen gegenüber dem TAM2-Modell (vgl. Abbildung 7).....	138
Abbildung 47: Adaptiertes TAM2-Modell (statistisches Modell) .....	152
Abbildung 48: Mediatorstest für die Variable ‚Verhaltensintention‘.....	154
Abbildung 49: Mediatorstest der Verhaltensintention im Basismodell (statistisches Modell) .....	155
Abbildung 50: Erweiterung des UTAUT um den Einflussfaktor TPACK (Konzeptmodell) .....	156
Abbildung 51: Erweitertes Modell mit zusätzlichen Wirkpfaden (statistisches Modell).....	157
Abbildung 52: Erweiterung des UTAUT um den Einflussfaktor TPACK (statistisches Modell) .....	157
Abbildung 53: Mediatorstest zum erweiterten TAM2/UTAUT-Modell (Konzeptmodell).....	158
Abbildung 54: Reduziertes Technologieakzeptanzmodell.....	163
Abbildung 55: Reduziertes adaptiertes Technologieakzeptanzmodell (statistisches Modell) .....	164
Abbildung 56: <i>Signed Ranks</i> des W-Tests (eigene Schema-Darstellung nach Bühner, 2011, S. 186).....	171
Abbildung 57: Ergebnisse der ANCOVA zur Bestimmung von Unterschieden in der Akzeptanz nach der Fortbildung.....	174
Abbildung 58: Anschreiben SCHILF.....	212

## 10. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Definitionen zum multimedialen Lernen nach R. Mayer (2014) .....	42
Tabelle 2: In der Applikation zur Verfügung stehende Cepheiden mit Entfernung und mittleren absoluten Helligkeit (Gaia Collaboration et al., 2018) .....	114
Tabelle 3: Übersicht der in der Applikation enthaltenen Supernovae vom Typ Ia. Die Daten entstammen aus einer sehr hohen Zahl von Quellen, die in der Applikation abrufbar sind. ....	126
Tabelle 4: Übersicht der in der Applikation enthaltenen Supernovae vom Typ Ib, Ic, und II. Die Daten entstammen aus einer sehr hohen Zahl von Quellen, die in der Applikation abrufbar sind.....	127
Tabelle 5: Fit-Indizes .....	142
Tabelle 6: Faustregel zur Interpretation des Cronbachs $\alpha$ .....	144
Tabelle 7: Skalenübersicht – Persönliche Relevanzeinschätzung .....	145
Tabelle 8: Skalenübersicht – Wahrgenommener Nutzen für SuS.....	146
Tabelle 9: Skalenübersicht – Wahrgenommener Bedienbarkeit .....	146
Tabelle 10: Skalenübersicht – Wahrgenommener persönlicher Nutzen.....	147
Tabelle 11: Skalenübersicht – Verhaltensintention .....	147
Tabelle 12: Skalenübersicht – Akzeptanzverhalten .....	147
Tabelle 13: Skalenübersicht – Inhaltswissen (CK).....	147
Tabelle 14: Skalenübersicht – Pädagogisches Inhaltswissen (PCK) .....	148
Tabelle 15: Skalenübersicht – Pädagogisches Wissen (PK).....	148
Tabelle 16: Skalenübersicht – Technologisches, pädagogisches und Inhaltswissen (TPACK) .....	149
Tabelle 17: Skalenübersicht – Technologisches Inhaltswissen (TCK) .....	149
Tabelle 18: Skalenübersicht – Technologisches-Pädagogisches Wissen (TPK).....	150
Tabelle 19: Skalenübersicht – Technologiewissen (TK) .....	150
Tabelle 20: Forschungsfrage 1 – Untersuchungshypothesen (Teilstudie 1).....	153
Tabelle 21: Forschungsfrage 2 – Untersuchungshypothesen (Teilstudie 1).....	159
Tabelle 22: Mittelwerte und Standardabweichungen der Cluster hinsichtlich Vorerfahrungen .....	173
Tabelle 23: Ergebnisse der Akzeptanzentwicklung mittels ANCOVA.....	174
Tabelle 24: Ergebnisse der ANCOVA.....	175
Tabelle 25: Gegenüberstellung der Original-Items und deren Adaption .....	213
Tabelle 26: Items zum TPACK.....	215
Tabelle 27: Persönliche Relevanzeinschätzung .....	217
Tabelle 28: Wahrgenommener Nutzen für Schülerinnen und Schüler.....	217

## 11. ANHANG



LMU, Didaktik der Physik LMU · Theresienstr. 37 · 80333 München

StR Peter Mayer  
Telefon: +49 (0) 89 - 2180-2860  
Telefax: +49 (0) 89 - 2180-2003

Per Email an:

xxx-Gymnasium xxx  
z.H. Schulleitung, Fachbetreuer Physik  
sekretariat@xxx.de

**pe.mayer@lmu.de**

[www.physik.lmu.de/didaktik](http://www.physik.lmu.de/didaktik)

Postanschrift  
Theresienstr. 37  
80333 München

München, 04.05.2017

Sehr geehrte Damen und Herren,

ich möchte Ihnen im Folgenden den kostenlosen und plattformübergreifenden Multimediaassistenten des Lehrstuhls Didaktik der Physik der LMU – **PUMA@LMU** – vorstellen.

**PUMA@LMU** erleichtert Ihnen und Ihren Kolleginnen und Kollegen die Integration von Simulationen und Animationen, von Experimentiervideos des Lehrstuhls, von YouTube Videos und von Webseiten in den Physikunterricht, indem Sie auf eine themensortierte Video-, Simulations- und Animationssammlung zurückgreifen können. **PUMA@LMU** bietet darüber hinaus diverse Möglichkeiten zur interaktiven Gestaltung z. B. von Kursen zum Grundwissen oder Arbeitsaufträgen und ermöglicht eine einfache Kooperation innerhalb der Fachschaft und auch mit Kolleginnen und Kollegen anderer Schulen, indem z. B. Kurse geteilt werden können.

Überzeugen Sie sich selbst indem Sie nachfolgendes Demo – aus Schülerperspektive – testen.

<http://www.physik-workshop.de/demo>

Falls **PUMA@LMU** Ihr Interesse geweckt hat, würde ich Ihnen und Ihren Kolleginnen und Kollegen **PUMA@LMU** gerne während eines zwei stündigen Workshops z. B. im Rahmen einer Fachsitzung bei Ihnen an der Schule vorstellen und Sie in die Bedienung von **PUMA@LMU** einführen. Damit diese Veranstaltung auch als Fortbildung gewertet werden kann, werde ich Ihnen im Rahmen dieses Workshops auch Einblicke in die aktuelle Forschung zum Multimediaeinsatz im Physikunterricht geben. Am Ende des Workshops erhalten Sie und Ihre Kolleginnen und Kollegen individuelle Zugangsdaten, damit auch Sie selbständig **PUMA@LMU** verwenden und im Unterricht einsetzen können. Die kostenlosen Workshops können Sie unter obigem Link buchen.

Mehr Informationen zu PUMA@LMU finden Sie unter folgendem Link:

[http://www.physik-workshop.de/vorlagen/Handout\\_PUMA@LMU.pdf](http://www.physik-workshop.de/vorlagen/Handout_PUMA@LMU.pdf)

Falls Sie noch Fragen haben, können Sie sich gerne direkt per Email an mich wenden!

Mit freundlichen Grüßen

StR Peter Mayer  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

**Abbildung 58: Anschreiben SchILF**

Tabelle 25: Gegenüberstellung der Original-Items und deren Adaption

Original (Venkatesh & Davis, 2000)	$\alpha$	Deutsche Übersetzung nach Olbrecht (2010)	$\alpha$	Adaption auf Multimediaanwendungen	$\alpha$
<b>Intention to Use</b>		Intention		Intention	
Assuming I have access to the system, I intend to use it.	0,82 – 0,97	Angenommen ich habe Zugang zum System, dann beabsichtige ich es zu nutzen.	0,84	Angenommen, ich habe an der Schule Zugang zu Multimediaanwendungen, dann setze ich diese im Unterricht ein.	.90
Given that I have access to the system, I predict that I would use it.		Wenn ich Zugang zum System habe, sage ich voraus, dass ich es nutzen werde.		Wenn ich Zugang zu Multimediaanwendungen bekomme, sage ich voraus, dass ich sie nutzen werde.	
<b>Perceived Usefulness</b>		Wahrgenommener Nutzen		Wahrgenommener persönlicher Nutzen	
Using the system improves my performance in my job.	0,87 – 0,97	Die Nutzung des Systems verbessert meine Arbeitsleistung.	0,90	Die Nutzung von Multimediaanwendungen verbessert meine Lehrleistung.	.84
Using the system in my job increases my productivity.		Die Nutzung des Systems erhöht die Produktivität meiner Arbeit.		Die Nutzung von Multimediaanwendungen reduziert mittelfristig meine Arbeitsbelastung.	
Using the system enhances my effectiveness in my job.		Die Nutzung des Systems steigert die Effektivität meiner Arbeit.		Die Nutzung von Multimediaanwendungen steigert die Effektivität meiner Arbeit.	
I find the system to be useful in my job.		Ich finde das System nützlich für meine Arbeit.		Ich finde Multimediaanwendungen nützlich für meine Arbeit.	
				Die Nutzung von Multimediaanwendungen erhöht die Lernleistung meiner Schüler.	
				Ein abwechslungsreicher Gebrauch von Multimediaanwendungen ist wichtig für das Lernen.	
				Das Einbinden von Multimediaanwendungen in den naturwissenschaftlichen Unterricht hilft den Schülerinnen und Schülern beim Lernen.	

## Anhang

				Multimediaanwendungen binden die Aufmerksamkeit der Schülerinnen und Schülern, sind aber im Lernprozess nicht hilfreich.	
				Schülerinnen und Schüler erlangen durch Multimediaanwendungen mehr Fachwissen.	
				Schülerinnen und Schüler erlernen durch Multimediaanwendungen, wie ein Sachverhalt auf unterschiedliche Arten veranschaulicht werden kann.	
<b>Perceived Ease of Use</b>		<b>Wahrgenommene Bedienbarkeit</b>		<b>Wahrgenommene Bedienbarkeit</b>	
<b>My interaction with the system is clear and understandable.</b>	0,86 – 0,98	Der Umgang mit dem System ist für mich klar und verständlich.	0,85  (0,90 ohne Item 3)	Der Umgang mit Multimediaanwendungen ist für mich klar und verständlich.	.75
<b>Interacting with the system does not require a lot of my mental effort.</b>		Der Umgang mit dem System erfordert von mir keine große geistige Anstrengung.		Der Umgang mit Multimediaanwendungen erfordert von mir große geistige Anstrengung.	
<b>I find the system to be easy to use.</b>		Ich finde das System leicht zu bedienen.		Ich finde die Nutzeroberfläche der meisten heutigen Multimediaanwendungen leicht zu bedienen.	
<b>I find it easy to get the system to do what I want it to do.</b>		Ich finde, das System macht ohne Probleme das, was ich möchte.		Damit Multimediaanwendungen gewinnbringend in den Unterricht eingebaut werden können, wäre ein Assistent notwendig, der sich um die Bedienung kümmert.	

Tabelle 26: Items zum TPACK

<b>Übersetzung und Adaption auf Multimediaanwendungen</b>	$\alpha$
<b>Inhaltswissen (CK)</b>	.86
Ich habe für das Unterrichten meines Fachgebiets ausreichend Fachwissen.	
Ich kann über Inhalte meines Fachgebiets nachdenken wie ein Fachwissenschaftler.	
Ich kann selbstständig ein tiefergehendes Verständnisniveau fachlicher Inhalte meines Fachgebiets erreichen.	
Ich bin zuversichtlich, dass ich alle Fachinhalte unterrichten kann.	
<b>Pädagogisches Inhaltswissen (PCK)</b>	.86
Ich schaffe es auch OHNE den Einsatz von modernen Technologien, den Unterrichtsinhalt auf unterschiedlichen Wegen verständlich zu machen.	
Ich schaffe es auch OHNE den Einsatz von modernen Technologien, den Lernschwierigkeiten meiner Schülerinnen und Schüler erfolgreich entgegenwirken.	
Ich schaffe es auch OHNE den Einsatz von modernen Technologien, meine Schülerinnen und Schüler zu tiefgehenden Diskussionen über den Unterrichtsinhalt anzuregen.	
Ich schaffe es auch OHNE den Einsatz von modernen Technologien, meine Schülerinnen und Schüler zur Lösung von Alltagsproblemen aus meinem Fachgebiet anzuregen.	
Ich schaffe es auch OHNE den Einsatz von modernen Technologien, den Lernprozess meiner Schülerinnen und Schüler in meinem Fachgebiet zu fördern.	
Ich kenne Kriterien für die Auswahl und den Einsatz von Multimediaanwendungen, die die Grundlage für einen erfolgreichen Lernprozess bilden sollen.	
Ich kann Multimediaanwendungen auf Basis von konkreten Kriterien auswählen, um so die Lernleistung von Schülerinnen und Schülern zu steigern.	
<b>Pädagogisches Wissen (PK)</b>	.88
Ich bin in der Lage, für meine Schülerinnen und Schüler anspruchsvolle Aufgaben zu erstellen, sodass diese ihren Horizont erweitern können.	
Ich bin in der Lage, meine Schülerinnen und Schüler zur Verinnerlichung von adäquaten Lernstrategien anzuleiten.	
Ich bin dazu in der Lage, meine Schülerinnen und Schüler bei der Reflexion ihres Lernprozesses zu unterstützen.	
Ich bin dazu in der Lage, meine Schülerinnen und Schüler dazu anzuleiten, ihre eigenen Lernstrategien zu reflektieren.	
Ich bin dazu in der Lage, meine Schülerinnen und Schüler im Rahmen von Gruppenarbeiten zur effektiven Diskussion anzuregen.	
<b>Technologisches, pädagogisches und Inhaltswissen (TPACK)</b>	

## Anhang

<p>Ich kann Diskussionsthemen aus meinem Fachgebiet formulieren und die Kooperation der Schülerinnen und Schüler durch den Einsatz von geeigneten Webanwendungen (Google Docs, Diskussionsforen, Chatportalen, ...) fördern</p> <p>Ich kann Schüleraktivitäten mit Hilfe von Multimediaanwendungen (Mindmaps, Wikis, Moodle, Mebis, ...) so strukturieren, dass diese Aktivitäten meine Schülerinnen und Schülern bei der Konstruktion von multiplen Repräsentationen eines Fachinhalts unterstützen.</p> <p>Ich kann mittels geeigneter Multimediaanwendungen (z. B. Simulationen, Online-Inhalte ...) Aktivitäten zum selbstständigen Lernen von Fachinhalten entwerfen.</p> <p>Ich kann mit Hilfe von Multimediaanwendungen Aktivitäten zum selbstständigen Erforschen von fachlichen Unterrichtsgegenständen entwerfen.</p>	.90
<p>Ich kann schülerzentrierte Unterrichtsstunden entwerfen, die in geeigneter Weise fachliche Inhalte, technologische Aspekte und pädagogische Gesichtspunkte vereinen.</p> <p><b>Technologisches Inhaltswissen (TCK)</b></p> <p>Ich kann Software verwenden, die speziell für mein Fachgebiet entwickelt wurde (z. B. CassyLab, Vernier VideoPhysics, ...).</p> <p>Ich kenne die wesentlichen Technologien, die ich zur Erforschung von Fachinhalten meines Unterrichtsgegenstandes benötige.</p> <p>Ich kann geeignete Technologien (z. B. Multimediaanwendungen, Simulationen, ...) einsetzen, um meinen Unterrichtsgegenstand zu veranschaulichen.</p> <p>Ich kann Multimediaanwendungen einsetzen, um den Schülerinnen und Schülern ein entdeckendes Lernen zu ermöglichen.</p>	.88
<p><b>Technologisches-Pädagogisches Wissen (TPK)</b></p> <p>Ich bin in der Lage, moderne Technologien einzusetzen, um meine Schüler in Alltagsprobleme einzuführen.</p> <p>Ich bin in der Lage, meinen Schülern die Planung und die Überwachung des eigenen Lernprozesses durch geeignete Technologien zu erleichtern.</p> <p>Durch den Einsatz von modernen Technologien bin ich in der Lage, meinen Schülern die Entwicklung unterschiedlicher Wissensrepräsentationen zu erleichtern.</p> <p>Ich bin durch den Einsatz von modernen Technologien in der Lage, meinen Schülern die Kooperation untereinander zu erleichtern.</p>	.90
<p><b>Technologiewissen (TK)</b></p> <p>Ich habe die nötigen technischen Fertigkeiten, um Computer effektiv einzusetzen.</p> <p>Ich kann mir den Einsatz von neuen Technologien leicht selbst beibringen.</p> <p>Ich weiß, wie ich beim Einsatz von modernen Technologien auftretende technische Probleme lösen kann.</p> <p>Ich halte stets mit der aktuellen technischen Entwicklung schritt.</p>	.93

Tabelle 27: Persönliche Relevanzeinschätzung

<b>Persönliche Relevanzeinschätzung – ergänzt und adaptiert auf Multimediaanwendungen</b>	$\alpha$
Multimediaanwendungen sind dazu geeignet, komplexe neue Inhalte zu veranschaulichen.	.85
Multimediaanwendungen sind dazu geeignet, komplexe neue Inhalte zu erklären.	
Multimediaanwendungen sind dazu geeignet, bereits gelernte Inhalte zu wiederholen.	
Multimediaanwendungen sind dazu geeignet, verschiedene Themenbereiche miteinander zu vernetzen.	
Multimediaanwendungen sind für die anschauliche Gestaltung des Stundeneinstiegs geeignet.	
Multimediaanwendungen sind dazu geeignet, Übungsaufgaben zu veranschaulichen.	
Multimediaanwendungen sind dazu geeignet, die Schüler für den Lerngegenstand zu motivieren.	
Im Lehrberuf ist die Verwendung von Multimediaanwendungen relevant.	

Tabelle 28: Wahrgenommener Nutzen für Schülerinnen und Schüler

<b>Wahrgenommener Nutzen für SuS – Venkatesh und Davis (2000) und adaptiert</b>	
Ich erwarte, dass Schülerinnen und Schüler, die mit Unterstützung durch Multimediaanwendungen unterrichtet wurden, mehr Fachwissen erlangt haben.	.84
Ich erwarte, dass Schülerinnen und Schüler, die mit Unterstützung durch Multimediaanwendungen unterrichtet wurden, das Erlernte flexibler auf andere Sachverhalte anwenden können.	
Ich erwarte, dass Schülerinnen und Schüler, die mit Unterstützung durch Multimediaanwendungen unterrichtet wurden, eine ausgeprägtere Fachsprache haben.	